55
Г-36.
3577

КХ

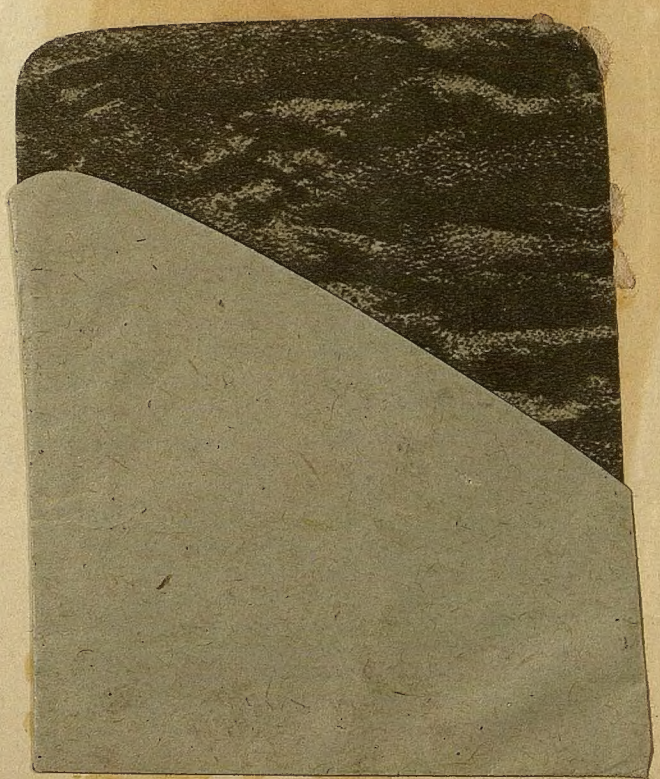
ГЕОЛОГИЯ и ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ СЕВЕРА СССР

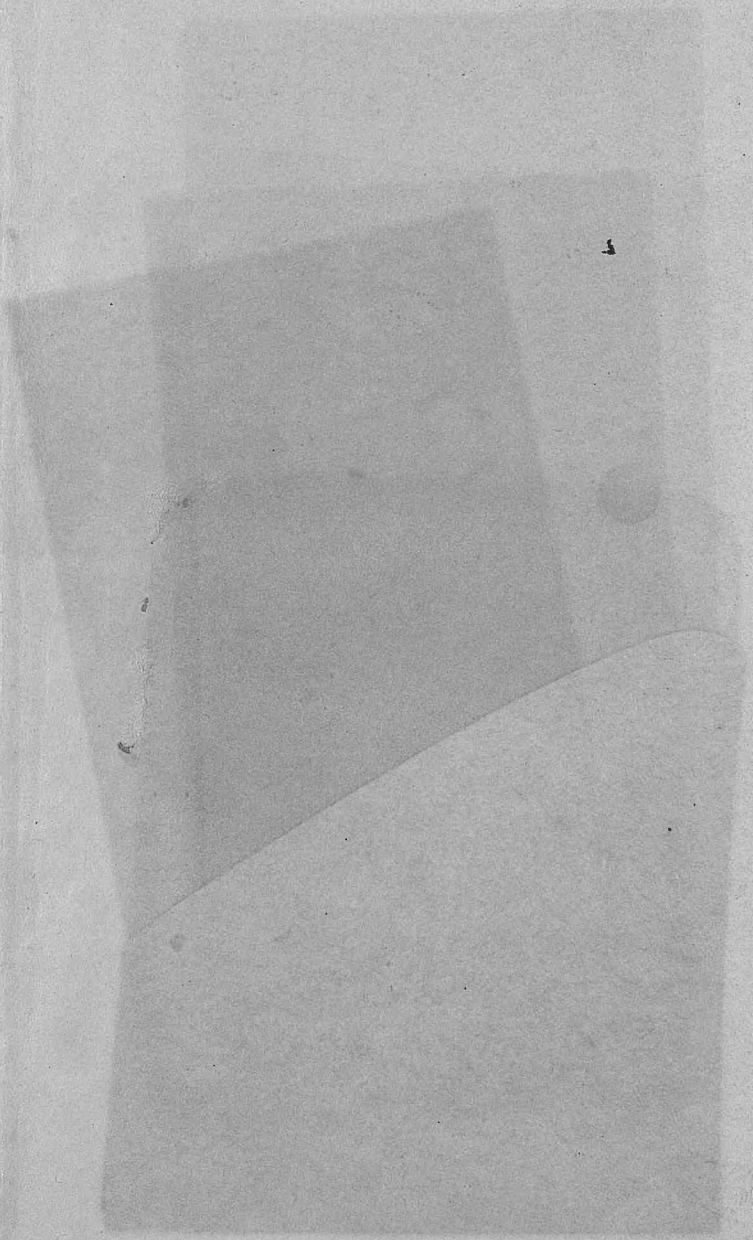
ТОМ III

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА

46

47





ПРОВЕРЕНО

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ ПРИ СНК СССР

Проверено
1950.

55
Г-36.
3577/2

ГЕОЛОГИЯ
И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ СЕВЕРА СССР

ТРУДЫ ПЕРВОЙ
ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ГЛАВСЕВМОРПУТИ
24—27 апреля 1935 г.

Том III

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА

3577

ЧІТАЛЬНА
Обл. Центр. Бібліотекалён
— Сыктывкар —

ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЛАВСЕВМОРПУТИ • ЛЕНИНГРАД • 1936

Редакционный совет:

Акад. А. Д. Архангельский. И. Л. Баевский. Н. Н. Бегичев. А. А. Блохин. М. В. Крейтер. Т. Т. Литвинов. Акад. В. А. Обручев. В. М. Пономарев. Р. Л. Самойлович. М. И. Сумгин. Н. Н. Урванцев. Н. С. Шатский.

Главный редактор Г. А. Ушаков

128 стр. + 2 вклейки

Ответственный редактор *Н. Н. Урванцев.* Технический редактор *А. А. Соловейчик.*

Сдано в набор 28 декабря 1935 г. Подписано к печати 15 марта 1936 г.
Бумага 72×105. 9 печ. л. 4½ бум. л. 12½ авт. л. 110 000 тип. зн. в 1 бум. л.
Ленгорлит № 9271 Заказ № 2077. Изд. № 25. Тираж 2000 экз.

Типография „Коминтерн" и школа ФЗУ им. КИМ'а. Ленинград, Красная 1.

ПРЕДИСЛОВИЕ

К систематическому изучению вечной мерзлоты наука приступила всего несколько десятков лет тому назад. Объясняется это тем, что огромные территории, занятые вечной мерзлотой, расположены в северных широтах или средних, но обладающих суровым, холодным климатом. С течением времени, когда эти территории стали постепенно осваиваться, люди столкнулись с наличием в этих районах вечной мерзлоты, причинявшей им немало трудностей. С этого времени и начинается ее изучение.

К сожалению, нельзя сказать, чтобы мерзлота была в необходимой степени изучена. Наибольший материал был получен лишь после Октябрьской революции, когда был дан мощный толчок хозяйственному развитию наших «окраин». Правда, и этот материал не является исчерпывающим. Взять хотя бы вопрос о температурном режиме мерзлоты. На территории Союза, занятой вечной мерзлотой, имеется огромное количество буровых скважин, в которых можно было бы, при надлежащем руководстве специалистов, произвести замеры температуры. На деле мы этого не имеем. Мы не можем даже сказать, что нам, хотя бы в основном, известен температурный режим мерзлоты, а между тем этот вопрос является одним из основных, позволяющих определить условия ее образования.

До сих пор идут еще споры о деградации вечной мерзлоты. Разрешение этого вопроса имеет существенное практическое значение. Между тем, вопрос о деградации является в первую очередь вопросом об условиях ее образования. В самом деле, как можно говорить — отступает или наступает сейчас мерзлота, если не учтены условия, в которых она образовалась. Следовательно, необходимо заняться в первую очередь выяснением условий ее образования.

Нельзя сказать, чтобы этим вопросом наши научные работники не занимались. Занимались, но недостаточно. По сути дела, до последнего времени изучение вечной мерзлоты сосредоточивалось в ее южной зоне, где она имеет мощность всего в несколько десятков метров и залегает

островами среди таликов. Основная зона мерзлоты находится на севере, и, безусловно, там нужно искать ключ к ее образованию.

Со всей серьезностью встает необходимость изучения четвертичной геологии Арктики. Вряд ли сейчас найдутся люди, оспаривающие мысль о том, что вечная мерзлота образовалась в четвертичное время. Только при помощи изучения четвертичной геологии мы яснее представим себе условия образования мерзлоты, а следовательно правильнее подойдем к вопросам борьбы с ней и ее использования.

Несмотря на все недостатки, за последние годы изучение мерзлоты сильно продвинулось вперед. Сейчас, когда поставлена задача освоения Северного морского пути, изучение мерзлоты, несомненно, пойдет вперед весьма быстро. С этой точки зрения 1935 год является переломным. В этом году создана довольно разветвленная сеть мерзлотных станций, где началось углубленное изучение мерзлоты. Уже получены чрезвычайно интересные материалы.

Дело в том, что до сих пор в зоне вечной мерзлоты отмечалось наличие теплых пресных вод, которые, по образному выражению М. И. Сумгина, пронизывают толщу мерзлоты наподобие кровеносных сосудов нашего тела. Однако, нами констатирована циркуляция в прибражно-морской мерзлой зоне соленых вод с температурой до —4° С, проникающих, повидимому, из моря. Это обстоятельство заставляет особенно осторожно подходить к эксплоатации месторождений полезных ископаемых на берегах полярных морей.

Второй вопрос касается мощности мерзлой зоны. До сих пор, до 1935 г., считали, что максимальная мощность мерзлоты в Союзе достигает вряд ли больше 200—220 метров. Бурение же в Амдерме (Пай-Хой, на берегу Карского моря) показало на глубине 214 м температуру —4,8° С. Это значит, что мощность мерзлой зоны в этом районе возможно достигнет 400 м.

В других пунктах крайнего Севера мерзлотными станциями также получены весьма интересные данные.

Конечно, эти материалы не могли попасть в прилагаемый том, который является сборником докладов, прочитанных на I геолого-разведочной конференции Главсевморпути в апреле 1935 года. Настоящий том не может претендовать на исчерпывающее изложение всех имевшихся в Союзе материалов по вечной мерзлоте. Здесь помещены лишь те материалы, которые были в первую очередь необходимы при изучении мерзлоты в Арктике.

Жизнь требует расширения и углубления знаний о вечной мерзлоте. Грандиозная задача, поставленная перед нами: освоение великого Северного морского пути и прилегающих к нему территорий, требует от нас уже сейчас ясного представления о мерзлоте со всех точек зрения. Нет сомнения, что ближайшие годы дадут достаточный материал

для того, чтобы приступить к решению проблемы вечной мерзлоты и тем самым поднять на высшую ступень геологическую науку. Это лишний раз подчеркивает, что действительный прогресс науки возможен только сейчас при диктатуре пролетариата, ибо только у нас ставятся и разрешаются проблемы, двигающие науку вперед.

В. Пономарев

М. И. СУМГИН

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА НА СЕВЕРЕ СССР

Под севером Азиатской части СССР в дальнейшем изложении мы понимаем для континента территорию, ограниченную с востока морями Тихого океана, с севера — морями Северного Ледовитого океана, с запада — Уральским хребтом и, наконец, с юга — условной линией, проходящей по 62 параллели. Кроме того, сюда же мы причисляем все острова, находящиеся к северу от Азиатского материка, и острова, расположенные к северу от Европейской части СССР. Делаем это мы потому, что в дальнейшем мы будем говорить о территории, находящейся в ведении Главного управления Северного морского пути, а эта территория лежит в указанных границах. Следовательно, Кольский полуостров, северная часть Карелии и Архангельско-Печорский край, являющиеся неотъемлемой частью севера нашего Союза, исключаются из нашего дальнейшего рассмотрения. Однако там, где понадобится, мы все-таки будем пользоваться данными и по этим частям севера СССР. Таким образом, описываемый нами «Север» есть несколько условная территория, взятая нами не по естественно-историческим, а по административным причинам.

В указанных пределах вечная мерзлота занимает площадь от 5 700 000 до 5 800 000 км², что составляет около 60% всей площади, занимаемой вечной мерзлотой в пределах СССР. Если же взять только площадь Севера в границах, оконтуренных нами выше, то окажется, что вечной мерзлотой занято 95—97% этой территории.

Таким образом, все естественно-исторические явления и вся хозяйственная деятельность человека на территории нашего Севера происходят при том или ином влиянии вечной мерзлоты. Поэтому едва ли найдутся возражения, если сказать, что изучение вечной мерзлоты является для этой территории безусловно необходимым. И оно не является новым делом для этой территории, так как на ней еще до революции были проведены весьма интересные работы по вечной мерзлоте: Врангеля, Майделя, Толля, Воллосовича и др.

Можно сказать, что самое признание существования вечной мерзлоты, как геофизического факта, произошло, по крайней мере для ученого мира Западной Европы, на основании исследований вечной мерзлоты, на территории Севера, в частности и в особенности в Якутске с ее Шергинской, Манганской и Шиловской шахтами. Читатель догадывается, что мы говорим о знаменитых в истории изучения вечной мерзлоты исследованиях акад. Миддендорфа — исследованиях, в свое время возбудивших к себе интерес ученых всего земного шара.

Изучение вечной мерзлоты на Севере продолжалось и после революции — в особенности Якутской комиссией Академии наук. Однако,

сравнительно с огромной территорией Севера, все эти работы, и старые и новые, несмотря на их исключительную ценность, недостаточны для освещения столь обширной и столь разнообразной по природе территории, занятой вечной мерзлотой на Севере.

Вот почему мы и высказали выше твердую уверенность в необходимости самого глубокого и разностороннего изучения вечной мерзлоты в темпах, которые бы предшествовали темпам освоения Севера.

Ясно, что перед началом больших работ нужно подытожить сделанные раньше работы, что мы и делаем в последующем изложении, правда, в самых общих чертах.

Мы уже указывали, что почти вся территория Севера занята вечной мерзлотой. Если мы взглянем на карту, то увидим, что к востоку от Енисея до самого побережья Тихого океана вечная мерзлота спускается далеко на юг от 62 параллели, принятой нами южным пределом Севера. В этой части Севера мы имеем географически сплошную вечную мерзлоту, массив которой лишь изредка прерывается небольшими таликовыми островами, обязанными своим существованием выходящим в виде ключей на дневную поверхность подземным водам. На западе от Енисея, где от Туруханска южная граница резко поворачивает на юг, мы можем встретить расположенные вдоль этой границы острова вечной мерзлоты, на что мы и находим указания в работе С. Л. Кушева.[1] Западная часть от Енисея до Уральского хребта, как видим на карте, не доходит на юге до 62 параллели. Следовательно, в этой части мы, теоретически говоря, должны иметь, по Городкову, вдоль южной окраины сначала густую цепь островов в минеральных и торфяных грунтах, затем только в торфяных, а затем и пространство без вечной мерзлоты. Специальных исследований в этом направлении на рассматриваемой территории не было, поэтому для доказательства подобного взгляда фактов, взятых на пространстве от Урала до Енисея, мы привести не можем, но мы имеем установленные подобные факты в других местах: Н. Г. Датским у Мезени и на р. Усе — притоке Печоры, В. К. Яновским на Печоре и А. Л. Биркенгофом — на самой восточной окраине массива вечной мерзлоты.

Таким образом, о характере географического распространения вечной мерзлоты на Севере мы в общих чертах можем говорить, в результате прошлых исследований, вполне определенно. Детали же требуют дальнейшего изучения. В числе этих деталей — и немаловажных деталей — стоит выяснение для западной части (от Урала до Енисея), где проходит линия, отграничивающая преимущественное распространение вечной мерзлоты от островного ее распространения. По неопубликованным еще данным В. Г. Петрова, острова вечной мерзлоты заходят южнее 62 параллели; следовательно, мы можем ожидать островов вечной мерзлоты на всей территории, которая на современных картах вечной мерзлоты занимает пространство между южной границей вечной мерзлоты и 62° сев. шир. Этот вопрос, как и ряд других, подлежит изучению.

По всем имеющимся у нас данным, острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, заняты сплошь вечной мерзлотой. Что касается морского дна, так в открытом море, так и у берегов, то на этот

---

[1] Труды Комиссии по изуч. вечной мерзлоты Акад. наук, т. III.

счет у нас мало данных. По сообщению С. С. Иоффе, в бухте Тикси, на расстоянии 45—50 м от берега, там, где подольдом остается слой воды, вечной мерзлоты бурением не обнаружено; то же наблюдается, по некоторым данным, и в бухте Варнека на Вайгаче. Но для бухты Варнека мы, со слов других, там работавших, знаем, что вечная мерзлота имеется вблизи берегов под дном моря, но она, уходя вглубь под некоторым углом, может быть обнаружена только более или менее глубоким бурением. Все это требует опытной проверки. И опять: по старым данным, на острове Большом Ляховском слои льда, находящиеся в береговых обрывах, местами уходят под дно океана. То же мы видим и у берегов Фадеевского острова и Новой Сибири. В этом отношении прежде всего нужно опубликовать те данные о вечной мерзлоте в морском дне у берегов материка и островов, которые уже имеются у Главсевморпути, и, с другой стороны, поставить специальные работы в этом направлении. По этому вопросу в старых исследованиях мало материала и нужно добывать его вновь.

Здесь следует высказать несколько мыслей теоретического порядка. На суше мы, как правило, имеем грунты при отрицательных температурах (как сезонную, так и вечную мерзлоту), сцементированные льдом. Лишь как исключение встречаем грунты, имеющие отрицательную температуру, но льдом не сцементированные, так называемую «сухую» мерзлоту.

На дне моря мы будем иметь рыхлые грунты, пропитанные соленой водой. Поэтому хотя они и будут иметь отрицательную температуру, однако будут сцементированы льдом только при известной температуре, а именно при —1,9°, т. е. при той, при которой замерзает морская вода. Следовательно, на дне моря мы будем иметь вечную мерзлоту особого типа, хотя и влажную, но не сцементированную льдом до —1,9°. Это будет морской тип вечной мерзлоты. Он будет везде, где на морском дне вода имеет отрицательную температуру выше указанной, как это нередко имеет место в Ледовитом океане и его морях, и мерзлоту, сцементированную льдом при температурах ниже —1,9°. На какую глубину в породе дна океана идет вечная мерзлота, пока нельзя сказать за полным отсутствием данных.

Перейдем теперь к вертикальному распространению вечной мерзлоты. Как известно, над ней находится слой почво-грунта, ежегодно оттаивающий и замерзающий, деятельный слой, как принято его называть. Мощность этого слоя связана с целым рядом факторов — климатом, рельефом, растительностью, характером почв и т. д. Мы определенно знаем, что при прочих равных условиях мощность деятельного слоя тем меньше, чем больше мы продвигаемся к северу; в одном и том же месте мощность деятельного слоя убывает в зависимости от грунта таким образом: в грунтах песчаных разностей она наибольшая; в торфяных — наименьшая; в глинистых заключается между мощностью в песчаных и торфяных грунтах, находясь все-таки ближе к песчаным грунтам.

В конкретных числах мы имеем на побережье Ледовитого океана мощность деятельного слоя в грунтах песчаных разностей — 1,2—1,6 м; в торфах — 0,20—0,40 м; в глинистых — 1,0—1,2 м. В Якутском районе — в грунтах песчаных разностей — 2,00—2,50 м; в торфах — 0,6—0,8 м.

Приведем несколько примеров характера протаивания почвы на Крайнем Севере и в других пунктах Севера.

Остров Диксона $\varphi = 73°30'22''$; $x = 80°23'$; площадка к северу от станции с уклоном до 15° на северо-восток с глинистой почвой; процесс оттаивания шел следующим образом:

1927 г.		1928 г.	
Начало таяния 1-я половина июня		Начало таяния средина июня	
15/VI	оттаяло на 9 см	17/VI	оттаяло 1 см
15/VII	„ „ 29 „	15/VII	„ 31 „
15/VIII	„ „ 61 „	12/VIII	„ 42 „
Примечание. Моховой покров на месте наблюдений 4—5 см.		Примечание. Моховой покров на месте наблюдений 8—11 см.	

Новый порт $\varphi = 67°42'$; $x = 72°57'$; площадка с песчаной почвой, покрыта тонким слоем мха, приблизительно ровная.

1927 г.		1928 г.	
8/V	оттаяло 2 см	13/V	оттаяло 2 см
8/VI	„ 27 „	13/VI	„ 33 „
1/VIII	„ 95 „	15/VII	„ 87 „
15/VIII	„ 108 „	16/VIII	„ 124 „

Примечание. Моховой покров на месте наблюдений — 2 см.

Усть-Енисейский порт. $\varphi = 69°37'36''$; $x = 84°21'45''$. Площадка приблизительно ровная, покрыта незначительным моховым покровом, растительность — карликовая береза, осока, пушица, морошка, редко — брусника. Имеются пятна без растительности. Почва близка к суглинку.

1927 г.		1928 г.	
15/V	оттаяло 2 см	6/VI	оттаяло 1 см
15/VI	„ 14 „	17/VI	„ 9 „
17/VII	„ 42 „	15/VII	„ 48 „
15/VIII	„ 63 „	15/VIII	„ 60 „
Примечание. Моховой покров на месте наблюдений 2—4 см.		Примечание. Моховой покров на месте наблюдений 2—4 см.	

Пархоменко приводит следующие глубины оттаивания, определенные им в 1921 г. в низовьях Лены и в дельте ее:

О. Самыттах	17/II	оттаяло 22 см	— торфяной покров
О. Астрономический	26/VI	„ 65 „	— песок
Залив Улахан-Креста, берег Северного Ледовитого океана	1/VIII	„ 38 „	— кочковатая тундра, глина
Село Жиганск	13/IX	„ 69 „	— глина

Аболин для Лено-Вилюйской равнины дает такие глубины оттаивания почвы:

Травяные вейниковые кочкарники

Урочище Сасыл-уята; почва на 30—40 см травяной торф, глубже — песок. 8/VII протаяло 110 см.

Сырые луга

Урочище Эрень-Кель; почва торфянисто-дерновая. 26/VII протаяло 135 см.

Сухие луга

Урочище Эрень-Кель; почва сухая, мало перегнойная, слабо дернистая. 22/VII оттаяло 180 см

Березовые леса

Река Кемкемя, густой березняк, почва сильно гумусная, умеренно влажная, ровное место. 20/VIII оттаяло 125 см.

Сосново-лиственичные боры на сухой песчаной почве

Река Кемкемя — сосна и лиственница, редина, покров не развит. 19/VIII оттаяло 190 см.

Сфагновые болота

Река Чукулка, северный склон в 10°, редкая мелкая лиственница, густой сфагновый покров, почва торфяная. 25/VIII оттаяло 30 см.

Из самых новейших материалов приведем данные о протаивании из работы П. К. Хмызникова «Гидрогеология бассейна р. Яны».

Площадка метстанции в Казачьем на р. Яне. На площади 12—15 м² в 10 замерах глубины протаивания в песчано-суглинистой толще на 17 сентября 1927 г. колебались от 36 до 85 см. Это свидетельствует о крайней пестроте глубины протаивания, на которую влияет, как указывалось, ряд факторов.

Скорость оттаивания грунта у Казачьего в начале лета примерно 1 см в сутки, в начале августа — 0,5 см в сутки.

Интересно то, что мерзлота была обнаружена под дном реки Яны. Так, 20 июля на главном русле Яны, в нескольких километрах выше притока Киселях, мерзлота под дном залегала на 35 см. Хмызников говорит, что при дноуглубительных и прочих технических работах примерную глубину оттаявшего слоя под дном реки и моря (у берегов) нужно считать около метра. Но вопрос этот у Хмызникова проработан слабо.

Г. А. Ушаков сообщил автору, что на острове Врангеля оттаивание почво-грунтов происходит на глубину примерно 40 см.

Все приведенные данные о протаивании почвы на Севере получены авторами непосредственными наблюдениями, т. е. копанием шурфов и измерением в них оттаявшего слоя.

Ограничимся приведенными примерами, отметив, что глубина оттаивания значительно меняется для тех же почв, если изменяются другие условия — влажность почв, густота растительности и т. д. Приведенные цифры дают лишь порядок величин протаивания почвы. На Крайнем Севере, как мы видим, почва в естественных условиях начинает оттаивать очень поздно — иногда в половине июня, что имеет значение, например, при посадке аэропланов.

К сказанному прибавим, что на острове Диксона в 1927 г. почва 20 сентября уже начала сверху мерзнуть и 16 ноября зимняя мерзлота сошлась с верхней границей вечной мерзлоты. Следовательно, верхние слои почвы были в талом состоянии всего около 3½ месяцев.

В Усть-Енисейском порту в 1927 г. почва начала мерзнуть сверху 5 октября, и зимняя мерзлота слилась с вечной 20 ноября. Следовательно, верхние слои почвы были в талом состоянии 4 месяца 20 дней.

Мощность деятельного слоя имеет огромное практическое значение и в сельском хозяйстве, и в лесоводстве, и при различного рода строительстве. Если мы возьмем Крайний Север, то для сельского хо-

зяйства малая мощность деятельного слоя будет крайне неблагоприятна, для фундаментов же зданий малая мощность деятельного слоя и краткий срок пребывания его в талом состоянии является положительным фактором, на что указывал Городков. Относительно мощности деятельного слоя имеющиеся материалы позволяют делать для всего Севера общие выводы и заключения, достаточные в первом приближении для практических целей. Требуется только изучение деталей — влияния растительности, экспозиции склонов и т. п. на мощность деятельного слоя. Этим и должны заняться мерзлотные станции и экспедиции, в особенности первые.

Переходя к мощности самой толщи вечной мерзлоты, мы должны констатировать в этом вопросе исключительную скудость данных. Прежде всего до сих пор мы на всем Севере не имеем шурфа или скважины, которые прошли бы весь слой вечной мерзлоты полностью. Если не считать бурения на нефть, поставленного Главсевморпутем на Нордвике, — а мы не можем в данную минуту (май 1935 г.) опираться на эти буровые, так как о них пока достоверно ничего нам неизвестно, — мы до сих пор в оценке мощности вечной мерзлоты на Севере (в нашей его трактовке) опираемся на Шергинскую шахту и на данные, полученные Миддендорфом в конце первой половины прошлого века, то-есть почти сто лет тому назад, и при этом опираемся, собственно говоря, на одну точку — Якутск. В Якутске мы имеем шахту Шергина — сухой колодец глубиной 116,4 м — всю целиком пройденную вечной мерзлотой без всяких талых прослойков, а также другие шахты (Шиловская, Манганская), но уже значительно меньшей глубины. На основании этих материалов мы можем заключить:

а) с несомненностью, что мощность вечной мерзлоты в Якутске превосходит 114,4 м (116,4—2,0), [1]

б) по экстраполяции, на основании измерений температур в Шергинской шахте, можем предположительно считать, что мощность вечной мерзлоты в Якутске около 180 м.

Данных из прежних исследований о мощности вечной мерзлоты прямых не имеется. Косвенные — залегание льдов в высоких берегах рек и океана на материке и на островах — имеются; по ним можно было с безошибочностью заключить, что мощность вечной мерзлоты в таких местах (архипелаг Новосибирских островов, берега Лены, побережье Ледовитого океана между устьем Лены и Индигирки и т. д.) более 40—50—60 м. Вот и все по старым, дореволюционным работам по мощности вечной мерзлоты на Севере.

Новейшие данные еще беднее — фактических данных о мощности вечной мерзлоты совсем нет, по крайней мере в литературе. Имеются только материалы, по которым мы можем судить о мощности вечной мерзлоты на Севере по аналогии и по довольно шаткой интерполяции. Во-первых, мы имеем в Усть-Енисейском порту температуру вечной мерзлоты на глубине 18 м порядка — 6°; если положить геотермическую ступень 30 м, то мощность вечной мерзлоты в Усть-Енисейском порту будет равна $30 \times 6 + (18 - 1\frac{1}{2}) = 196{,}5$ м — кругло 200 м; если положить геотермическую ступень 20 м, то соответственно мощность будет равна 136,5 м. [2] Шаткость этих заключений состоит в том, что нам

[1] Вычтено 2 метра,—это примерная мощность деятельного слоя в Якутске.

[2] Вычтено 1,5 метра,— это примерная мощность деятельного слоя в Усть-Енисейском порту.

неизвестна геотермическая ступень в толще вечной мерзлоты. Но все-таки, по нашему мнению, для Усть-Енисейского порта на основании геотермического анализа указанной выше температуры мы можем утверждать, что мощность вечной мерзлоты в этом месте не менее 100 м — это мы можем именно утверждать, а не предполагать.

Затем для Воркутского рудника — к западу от Урала на р. Воркуте, впадающей в Усу, которая является притоком Печоры, мы имеем мощность вечной мерзлоты не менее 60 м по данным, полученным в буровой скважине. Мы полагаем, что и для района к востоку от Урала до Енисея на тех же широтах мощность вечной мерзлоты не меньше 60 м.

Вот и все, что мы можем сказать и точно и предположительно относительно мощности вечной мерзлоты на территории в 5 700 000 км². Конечно, это слишком мало, и эту сторону дела мы должны считать для Севера не изученной.[1] В дальнейшем изучение этого вопроса можно или решить путем собирания данных от промышленного бурения, которое уже производится и будет производиться на Севере; или поставить как специальную научную задачу — определить в нескольких, по плану установленных, точках мощность вечной мерзлоты на территории Севера. В идеале мыслится пробурить в плановом порядке несколько буровых линий по меридианам и две-три линии по широте, поперек и вдоль вечной мерзлоты Севера. Работа эта должна быть разложена на несколько лет.

Было бы самонадеянным рассчитывать только на второй путь и было бы ошибочно и нерасчетливо итти только по первому пути. Самое правильное решение — итти обоими путями, т. е. используя то, что дает промышленное бурение и ставя специальные буровые для определения мощности вечной мерзлоты (и попутно, как увидим ниже, для изучения других свойств). Только идя по обоим путям, мы с наименьшей затратой средств определим мощность вечной мерзлоты на Севере.

Переходим к другому важному элементу вечной мерзлоты — к температуре в ее толще. И опять, если судить по материалам, имеющимся в печати, главные наши сведения по температурам толщи вечной мерзлоты относятся к данным, собранным сто лет тому назад главным образом академиком Миддендорфом. Новейшие напечатанные сведения имеются только для Усть-Енисейского порта и Якутска.

Поэтому остановимся сначала на старых, дореволюционных данных. Миддендорф в Туруханске пробурил несколько скважин, наибольшую из них до глубины 41 ф., и произвел в двух из них температурные наблюдения сначала весной, а затем в декабре 1843 г. Температуры в скважинах (в декабре глубже сезонного промерзания) оказались до 24 ф. положительными, но очень близкими к нулю; начиная с глубины 24 ф. стали появляться нулевые температуры, а на глубине 41 ф. 29—31 марта он определил —0,1°.[2] На Введенском зимовье, на Пясине в ноябре 1843 г. на глубине 13 ф. Миддендорф нашел —4,5°.

В Амгинской слободе (в 3 км от нее) температуры почво-грунтов были таковы:

---

[1] Мы умалчиваем о бурении, происходящем в данный момент у мыса Нордвик, откуда идут сведения, что на глубине 180 м нашли — 3° С; но это пока слухи, а потому мы не пользуемся этими данными.

[2] Отметки температур у Миддендорфа здесь и дальше (кроме Шергинской шахты) даются по Реомюру.

Время наблюдения	Глубина в футах								
	7	10	14	20	21	30	40	50	60
1845 г. 23 мая	—2,85	—	—2,9	—	—2,3	—	—	—1,7	—1,8
28 мая	—	—2,9	—	—2,2	—	—1,9	—1,75	—	—1,8
1846 г. 25 марта	—4,7	—	—3,9	—	—3,2	—	—	—1,9	—1,8

При впадении Маи в Алдан в Давидовской шахте (мы бы назвали ее шурфом) температура на глубине 35 ф. в самом конце марта оказалась равной минус одному градусу.

В Олекминске в июле 1846 г. Миддендорф нашел до глубины 20 ф. отрицательные температуры в пределах от трети до полградуса, а в Витимске в сентябре 1845 г. до глубины 25 ф. — положительные в пределах от 6 до 3 градусов (последняя на глубине 25 ф.).

Но особенно подробные и продолжительные наблюдения над температурой почво-грунтов Миддендорф вел в Якутске и его окрестностях, а из якутских наблюдений в Шергинской шахте.

Приведем сначала некоторые цифры из всех этих наблюдений, а затем выскажем о них наше мнение.

Температуры в Шергинской шахте оказались, по Миддендорфу, следующими:

Глубины		Средние годов. темпер.	
в анг. футах	в метр.	в град. R	в град. C
7	2,13	—8,94	—11,18
15	4,57	—8,15	—10,19
20	6,10	—8,13	—10,16
50	15,24	—6,61	—8,26
100	30,48	—5,22	—6,52
150	45,72	—4,64	—5,80
200	60,96	—3,88	—4,85
250	76,20	—3,34	—4,18
300	91,44	—3,11	—3,89
350	106,68	—2,73	—3,41
382	116,43	—2,40	—3,00

Температура в Шиловской шахте (на высотах левого берега Лены — около 6 км от Якутска).

На глубине 20 фут.	Темпер. в град. R	На глубине 50 фут.	Темпер. в град. R
20 ноября 1844 г.	—3,0	7 апреля 1845 г.	—2,5
25 апреля 1846 г.	—4,2	26 апреля 1845 г.	—3,0
18 июня 1846 г.	—4,0	17 апреля 1846 г.	—3,2
		18 июня 1846 г.	—3,1

Температура в Манганской шахте (на тех же высотах, что и Шиловская шахта, но немного севернее):

На глубине 20 фут. Темпер. в град. R		На глубине 50 фут. Темпер. в град. R	
10 марта 1846 г.	— 6,3	10 марта 1846 г.	— 2,8
25 апреля 1846 г.	— 5,1	21 апреля 1846 г.	— 2,7
30 мая 1846 г.	— 4,6	23 апреля 1846 г.	— 2,8

Как видно из приведенных в выдержках цифр, температуры в Шергинской шахте много ниже, чем в Шиловской и Манганской. Последние шахты, устья их, лежат выше на 353 фута Шергинской шахты (устья ее). Можно бы приписать разницу в температурах разности высот исследованных шахт, сказав, что в более низких местах температуры воздуха ниже, чем на высоких местах, от скопления в низинах холодного воздуха и т. д., но дело в том, что наблюдения температур в Шергинской шахте, организованные и проведенные Миддендорфом, подверглись, еще при его жизни, сомнению, так как купец Шергин начал рыть свой колодец (шахту) в 1828 г. и кончил работу в 1837 г., а Миддендорф организовал наблюдения температуры в шахте (колодце) только 5 апреля 1844 г. и продолжал их до 18 июня 1846 г. Возникла мысль, не охладились ли стенки шахты и не производил ли свои наблюдения Миддендорф в среде с уже нарушенной температурой. Мысль эту особенно отстаивал академик Бер. Около температур Шергинской шахты возник тогда же научный спор, который в сущности не кончился до сих пор — так и находятся эти температуры под сомнением, требуя правильно поставленной проверки.

Вторыми по значению из дореволюционных наблюдений над температурой почвы были наблюдения на о. Сагастыре и в Малых Кармакулах во время первого международного полярного года (1882/1883 г.). Но в Сагастыре (устье Лены) эти наблюдения, во-первых, производились всего до глубины 1,6 м, и, во-вторых, к сожалению, полный год только на глубине 0,4 м. Такие же наблюдения были организованы и в Малых Кармакулах на о. Новая Земля. По этим наблюдениям мощность деятельного слоя оказалась равной 1,6 м в обоих пунктах, затем был установлен годовой ход температуры на разных глубинах и еще ряд моментов. Например, в Сагастыре (устье р. Лены) на глубине 0,4 м средние месячные температуры были положительными всего 3 месяца (июль — сентябрь), на глубине 0,8 м — только один месяц сентябрь.

Вот, собственно говоря, и весь багаж почвенных температур на Севере, который перешел к нам от дореволюционного времени. Основными данными были действительно широко и обстоятельно поставленные наблюдения Миддендорфа, хотя главнейшие из них (Шергинская шахта) и были подвергнуты сомнению.

Послереволюционное время прибавило нам по напечатанным данным наблюдения в Усть-Енисейском порту (69°37′ сев. шир. и 84°21′ вост. долг. от Гринвича).

Летом 1929 г. буровая партия Комсевпути заложила в указанном пункте несколько буровых скважин, из которых наиболее глубокая имела 18 м. И. Т. Гутерман воспользовался этими скважинами для производства в них температурных наблюдений. Мы приводим ниже часть этих наблюдений.

Все скважины находились на площадке, покрытой тундровой растительностью — мхом, багульником и карликовой березой. Толщина мохового покрова — 5,8 см; глубина залегания верхней границы вечной мерзлоты 80—110 см. Диаметр скважин 2,5 дюйма. Зимой скважины тщательно закрывались деревянными пробками.

Наблюдения температуры грунта в скважинах в Усть-Енисейском порту в 1929—1930 гг.

Скважина № 8			Скважина № 3			Скважина № 7		
Месяц и число	Глуб. в м	Темп. гр. С	Месяц и число	Глуб. в м	Темп. гр. С	Месяц и число	Глуб. в м	Темп. град. С
17/IX	1	—1,2	19/XII	1	—13,0	8/II—30	1	—13,6
18/X	1	—1,8	—	—	—	6/II	2	—10,3
19/IX	2	—2,8	10/XII	2	— 8,0	1/II	4	—7,2
11/X	2	—2,4	—	—	—	10/III	4	—9,0
18/IX	4	—5,5	2/XII	4	— 4,3	28/I	6	—4,7
19/IX	6	—7,4	28/XI	6	— 6,2	27/I	8	—5,3
18/IX	8	—7,6	26/XI	8	— 7,1	1/III	8	—5,5
18/IX	10	—7,2	25/XII	8	— 6,8	10/V	8	—6,8
9/X	10	—7,1	25/XI	11	— 7,2	25/I	10	—5,7
17/IX	12	—6,7				10/III	10	—5,5
18/IX	12	—6,7				14/V	10	—5,7
19/IX	16	—6,4				24/I	12	—5,8
19/IX	18	—6,3				27/II	12	—5,6
8/X	18	—6,4				1/IV	12	—5,4
13/X	18	—6,3				15/V	12	—5,4
18/X	18	—6,3						

Состав грунта в скважинах таков:

Глубина в метрах	Характер грунта
0,1— 0,2	Мох, корни растений
0,2— 0,8	Желтая пылеватая супесь
0,8—13,0	Пылеватая супесь серовато-синеватого цвета с прослойкой бурого суглинка.
13,0—18,0	Синий суглинок

Если всмотреться в помещенную нами таблицу, анализируя ее и по вертикали — в каждой скважине — и по горизонтали — в разных скважинах на одинаковых глубинах, — мы должны заключить, что температуры даны не безукоризненные: есть невязки. Но ошибка для глубин, начиная с 6 м, не должна быть больше одного градуса. С учетом этой поправки данные о температурах в Усть-Енисейском порту все-таки имеют большую ценность, в особенности с практической стороны — именно, инженер на основании этой таблицы знает, какого порядка температуру встретит он до глубины 18 м. Эта температура резко разнится от температуры других районов области вечной мерзлоты. Так, в Дальневосточном крае южнее Станового хребта и в Забайкалье на аналогичных глубинах мы имеем температуру от —0,5 до —1,0—2,0°, реже несколько ниже. В бассейне р. Усы, притока Печоры, на широтах, примерно, устья р. Воркуты также на этих глубинах температуры порядка минус одного градуса, редко —2—2,5°.

И если мы при указанных температурах в Дальневосточном крае иногда даем указания на постройку сооружений с сохранением режима вечной мерзлоты, то такие указания для Усть-Енисейского порта при отмеченных в приведенной таблице температурах, по крайней мере для жилых зданий и им подобных по температурам, естественны. Для горячих цехов этот вопрос следует еще тщательно проанализировать.

Затем Якутский Гидрометеорологический институт в 1930 г. установил на площадке института в Якутске серию почвенных термометров до глубины 3,2 м, а в 1931 г. — еще термометр на глубине 6,4 м. Температуры по этим термометрам приведены в статье М. И. Сумгина и Шимановского и даются нами в следующей таблице:

Глубина в метрах	Средн. годов. темпер. в град. С	
0,8	—5,2	За время с I/XI 1930 по 31/X 1931 г.
1,6	—5,3	
2,0	—5,3	
2,4	—5,2	
3,2	—5,0	
6,4	—3,6	За 20 дней ноября 1931 г.

Эти температуры примерно в два раза выше, чем на соответствующих глубинах в Шергинской шахте. Термометры были установлены недалеко от города в эбонитовых трубках в условиях естественного покрова почвы (летом — трава, зимой — снег).

Как видим, для огромнейшей территории от Урала до Чукотского края и от Северного Ледовитого океана до Якутска данные о температурах вечной мерзлоты по количеству пунктов ничтожны; кроме того, эти данные не блещут полнотой и точностью. Отсюда получается непререкаемый вывод: изучение температуры горных пород Севера стоит перед нами настоятельной и весьма важной задачей и для практики строительной и сельскохозяйственной. Однако имеются неопубликованные еще материалы о почвенных температурах Севера. Это, во-первых, материалы по почвенным температурам на площадке Якутского гидрометеорологического института. Эти данные уже накопились за пять лет.

В нашем распоряжении имеются температуры за январь — ноябрь 1934 г. включительно, сообщенные нам инж. В. Ф. Жуковым. Большого различия с вышеприведенными цифрами данные за 1934 г. не имеют. Есть только одно дополнение — температуры на глубине 13 м за те же 11 месяцев. Они за это время колебались в пределах от —2,7° до —2,9°.

Кроме того, инж. Жуков сообщил нам результаты наблюдений, произведенных в 1934 г. 15 июня, 15 июля и 11 октября в Шергинской шахте на разных глубинах.

Приводим эти цифры в средних за все три срока наблюдений, начиная с глубины 10 м.

Глубины в метрах	Темпер. в град. С	Глубины в метрах	Темпер. в град. С
10	—7,5	100	—3,8
20	—6,9	110	—3,5
30	—6,6	120	—3,2
40	—6,1	140	—2,6
50	—5,6		
60	—5,2		
70	—4,9		
80	—4,5		
90	—4,2		

Если сравнить эти цифры с полученными Миддендорфом, то получим несколько неожиданные результаты:

ЧІТАЛЊА
Обл. Центр. Бібліотекалён
— Сыктывкар —

3527

У Миддендорфа		Современн. наблюдения		Примечание
Глуб. в м	Темп. в гр. С	Глуб. в м	Темп. в гр. С	
15,24	—8,26	15	—7,2	Ср. по глуб. 10 и 20 м
30,48	—6,52	30	—6,6	
45,72	—5,80	45	—5,85	Ср. по глуб. 40 и 50 м
60,96	—4,85	60	—5,2	
91,44	—3,89	90	—4,2	
106,68	—3,41	105	—3,7	Ср. из глуб. 100 и 110 м
116,43	—3,0	115	—3,35	Ср. из глуб. 110 и 120 м

Как видим, температуры в верхней части шахты выше или равны данным Миддендорфа, тогда как в нижней части температуры везде ниже; особенно это ясно на новой глубине 120 м, которой у Миддендорфа не было — на этой глубине ныне имеется —3,2°, а у Миддендорфа на глубине 116,43 м было —3,0°.

Признать охлаждение нижних слоев при утеплении верхних слоев шахты трудно. В конце концов имеющимися данными «загадка Миддендорфа» еще усложнилась.

Затем на месте Балбукского месторождения (в Верхоянском хребте) были произведены наблюдения над температурой пород в штольне и шахте. Наблюдения производил М. Кац под руководством инж. В. Н. Протопопова.[1]

В штольне, врытой в гору на 50 м, температуры оказались следующими (абс. высота штольни около 1410 м):

Расстояние от входа в штольню в метрах	Температура в град. С	
10	—5,6	В среднем с 1/VIII по 8/XI 1930 г.
20	—5,1	
34,5	—4,4	
50	—6,9	

В шахте же (абс. высота около 1450 м) на глубине 22 м за время 28/VII—3/VIII (всего 7 наблюдений) температура в среднем оказалась равной —7,8°, причем отклонения отдельных наблюдений были всего на одну десятую градуса в ту и другую сторону от средней величины. Наблюдения производились в шпурах, пробитых в породе на глубину 50—100 см. Затем в наших руках имеются наблюдения на Колыме (при впадении в нее Средникана) за время с 1 декабря 1933 г. по 31 августа 1934 г. Наблюдения производил К. Н. Жуков.

Из этих данных интересна совершенно неожиданная температура на глубине 6 м, где она с декабря 1933 г. по август 1934 г. включительно неизменно стояла на —0,4°. На глубине 3,2 м за это же время в средних месячных температура колебалась от —0,2 до —0,6°.

Снежный покров в Средникане был в декабре 1933 г. 53 см, в январе 70 см, в феврале 81 см, в марте 87 см, в апреле 86 см, в мае 46 см, причем снег сошел 21 мая. Наконец, в Салехарте (Обдорске) в 1933 г.

[1] Данные мной получены от В. Федорцева.

температура определилась в котловане при строительных работах и за июль — сентябрь колебалась в следующих пределах:[1]

Эти еще не появившиеся в печати материалы чрезвычайно поучительны, особенно в Средникане на Колыме. В самом деле, данные по Балбукскому месторождению все-таки увязываются с данными, полученными в Якутске и Усть-Енисейском порту. Но наблюдения колымских температур на глубине 6 м дают величины более высокие, чем в Сковородине, далеко на юге. Это говорит за то, что по якутским и другим данным мы не можем экстраполировать почвенные температуры по бесконечным пространствам Севера. Для объяснения высоких почвенных температур в Средникане мы имеем весьма значительную мощность снежного покрова. Но надо между снежным покровом и температурами почвы найти более тесную зависимость. Вообще имеющиеся данные говорят за то, что нужно безотлагательно изучать почвенные температуры на нашем Севере.

Перейдем теперь к гидрологическим условиям Севера. Наличие отрицательных температур в почве, как известно, сильно усложняет режим наземных и подземных вод. В состав подземных вод внедряется лед, как полноправная часть их, причем местами лед составляет гораздо бо́льшую часть подземных вод данной территории, чем вода. Было время, когда самый вопрос о наличии жидкой фазы грунтовых вод в условиях Севера подвергался сомнению. Но рассмотрим вопрос по порядку. Прежде всего остановимся на поверхностных водах. Реки области вечной мерзлоты могут быть классифицированы по признаку развития в их бассейнах вечной мерзлоты.[2] Реки, всем своим бассейном находящиеся в области вечной мерзлоты, назовем реками первого класса, например: Лена, Яна, Колыма и др. Реки, находящиеся частью своего бассейна в области вечной мерзлоты, частью же вне этой области, назовем реками второго класса: Печора, Обь, Енисей, Амур.

По отношению к Северу первый класс рек можно бы разбить на два подкласса; первый: реки, всем своим бассейном расположенные в пределах Севера (Таз, Анадырь, Хатанга и другие); второй подкласс — реки, верховьями своими находящиеся в южных частях области вечной мерзлоты — Лена.

Со стороны изучения гидрологии Севера наибольший интерес представляют реки первого подкласса первого класса так как здесь именно можно в чистоте изучить влияние поверхностного стока грунтовых вод на режим рек Севера с его мощным слоем вечной мерзлоты и вообще сплошным географическим ее распространением (к востоку от Енисея), а также при суровом климате Севера.

Зимой дебит всех вообще рек первого класса сильно падает. Даже на больших реках за 4—6 теплых месяцев стекает 90—95% всего годового стока.[3] Мелкие реки и речки промерзают до дна, часто в них промерзают и воды, текущие в наносах их долин. Но и крупные сравнительно реки в ряде мест промерзают до дна. Три фактора являются

[1] Данные взяты из работы Е. Н. Цыпленкова.

Глубины в метр. . . .	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	5,00
Колебан. температ. . .	от 2,0 до 4	от +0,3 до —1,0	от —0,8 до —2,0	от —1,1 до —3,0	от —2,2 до —4,0	от —2,2 до —4,0

[2] Аналогичную классификацию выдвигал в начале этого столетия В. Г. Шостакович.

[3] Б. Д. Зайков. Сток на территории Якутской АССР. Известия Гидрологического института, т. XII.

причиной глубокого промерзания и частью полного вымерзания речек: первый — зимнее маловодье их вследствие малого количества грунтовых вод, о чем мы подробнее скажем дальше; второй — суровость климата Севера, причем местами и снежный покров ничтожен; и третий фактор — низкая, как правило, температура грунтовых вод.

Зимний режим рек Севера должен быть серьезно изучен, так как этот вопрос глубоко практический.[1] С ним связано зимнее водоснабжение промышленных и сельскохозяйственных предприятий; с ним связано устройство в будущем гидростанций, которые должны давать энергию и зимой при исключительно малом дебите. Нужно прямо сказать, что малый зимний дебит рек севера СССР явится значительным затруднением в деле промышленного и сельскохозяйственного освоения этого края. Разумеется, техника победит это затруднение, но нужно заранее эти затруднения предвидеть и проработать методы их уничтожения.

Приведем несколько примеров расходов рек по сезонам, как иллюстрацию сказанному выше.

Река Вилюй у села Сунтара

Сезоны	Сток в процент. от годового в среднем за 1925—1930 гг.
Зима (X—IV)	4,1
Весна (V—VI)	67,0
Лето (VII - VIII)	22,7
Осень (IX)	6,2

Река Яна

У г. Верхоянска		У села Казачьего	
Зима (X—V) 5,2%	За годы 1925—1928	Зима (X—V) 5,9%	За годы 1926—1928
Весна (VI) 13,2		Весна (VI) 20,4	
Лето (VII—VIII) 68,0		Лето (VII—VIII) 62,2	
Осень (IX) 13,6		Осень (IX) 11,5	

Река Индигирка у села Майор-Крест

Зима (X—V) 6,5	За 1929—1930 гг.
Весна (VI) 14,5	
Лето (VII—VIII) 63,8	
Осень (IX) 15,2	

Река Колыма у Среднеколымска[2]

Зима (X—V) 9,4	1926—1929 гг.
Весна (VI) 36,7	
Лето (VII—VIII) 39,8	
Осень (IX) 14,1	

Надо полагать, что в реках второго класса режим стока будет иной.

Исследования рек Севера за последние годы позволяют окончательно отвергнуть одно крепко привившееся неправильное утверждение о годовом ходе уровня рек области вечной мерзлоты. Именно, В. Б. Шостакович утверждал, а другие (Воейков, Львов) за ним вторили, что

---

[1] Для реки Яны это сделано П. К. Хмызниковым (Гидрология бассейна р. Яны. Изд. Ак. наук и Главсевморпути, Л., 1934).

[2] Б. Д. Зайков (там же).

весенний подъем вод в реках области вечной мерзлоты «очень незначителен». Приведем несколько цифр, позаимствованных у Б. Д. Зайкова.

Вилюй и Сунтара. Весна 1927 г. — максимальный расход около 9000 м³/с; максимум расхода летом 6—8 тыс. м³/с.

Колыма у Среднеколымска. Весна 1929 г.—расход около 16 000 м³/с; лето около 8000 м³/с; отношение максимальных расходов 2 : 1.

Яна у с. Казачьего. Весна 1928 г. — при вскрытии около 2500 м³/с: максимальный летний паводок около 8500 м³/с.

Индигирка у с. Майор-Крест. Весна 1931 г. — расход 2500 м³/с, летний паводок около 7000 м³/с.

Как видим, Вилюй и Колыма имеют большие паводки именно весной, а Яна и Индигирка не имеют весенних паводков, а между тем каждая из четырех названных рек всем своим бассейном находится в области географически сплошной вечной мерзлоты, а следовательно этот фактор одинаков для всех рек. Причина различия в высоте весенних паводков лежит в различии высоты снежного покрова в бассейнах этих рек, на что будет указано ниже.

Чтобы закончить о реках, отметим «реки продольного питания», как назвал их М. М. Ермолаев. Это реки, питающиеся водами от оттаивающих погребенных льдов; они, не принимая в себя ни одного притока, делаются все многоводнее и многоводнее по мере приближения к своему устью. Такие реки встречены на Большом Ляховском острове и на побережье в районе залегания ледяных масс в грунте.

Озера на Севере мало исследованы. Имеются измерения температур в ряде озер еще Миддендорфом, затем В. Б. Шостакович напечатал интересную работу о температурах озера Сардонах у Верхоянска.[1] В литературе есть разбросанные сведения о вытекших озерах, об образовании в них булгунняхов и т. д., но это беглые заметки путешественников. Исследование озер Севера, можно сказать, целиком дело будущего. А между тем на Севере имеются и отдельные значительные озера и территории, по количеству озер не уступающие Карелии.

Грунтовые воды области вечной мерзлоты, по Н. И. Толстихину, подразделяются на над-, меж- и подмерзлотные — деление, как видим, базирующееся на взаимоотношении между водой и вечной мерзлотой. По физическому состоянию грунтовая вода может быть в жидкой, твердой и газообразной фазе. Мы пока остановимся на первой.

Прежде всего укажем, что грунтовые воды на Севере имеются. По связи с мощностью деятельного слоя нужно ожидать, что на Крайнем Севере, где деятельный слой незначителен, надмерзлотные воды имеют незначительное распространение; но и другие виды подземных вод также незначительны на Севере. Об этом говорят цифры грунтового питания рек Севера первого класса. Так, по Б. Д. Зайкову, мы имеем:

Колыма	1928—1929 г.	5,3%	грунт. питания от годового стока
Вилюй	1926—1927 г.	2,0	„ „ „ „ „
Яна	1927—1928 г.	1,8	„ „ „ „ „

О незначительном количестве грунтовых вод на Севере говорят и наледные явления, о которых мы скажем ниже. Но все сказанное отнюдь не говорит о том, что на Севере дело с грунтовыми водами обстоит безнадежно. Имеются данные, говорящие о том, что и на Севере мы

[1] В. Б. Шостакович. Температура воды одного полярного озера. Изд. Ак. наук СПб., 1907.

имеем местами обильные грунтовые воды, о чем можно судить по крупным наледям — речным и грунтовым. Подробно в этом мы разберемся дальше, а здесь только скажем, что по нашим вычислениям источники, питающие Кыра-Нехаранскую наледь, дают от 4 до 8 куб. метров в сек. Б. Д. Зайков отмечает, что р. Омолон до 20—30% всей площади зеркала реки имеет свободной зимой от льда; то же и на р. Коркодоне выше впадения в нее р. Рассохи. Старые данные говорят нам о полыньях зимой на Анюе.

Все это говорит за то, что и по современным и по старым данным в известных районах Севера грунтовые воды имеются. Однако выяснение состояния подземных вод Севера, в частности, подмерзлотных, о которых совсем нет никаких данных, — дело будущего. Надо всемерно стремиться к тому, чтобы это будущее стало ближайшим будущим. Говорим мы так потому, что дело освоения Севера уже происходит. Пока оно идет по водным путям — морем и по большим рекам. Но это пути известные с давности. Пути освоения должны перейти на водоразделы, где будут встречаться только мелкие реки и речки, часто промерзающие полностью. Источником водоснабжения остаются грунтовые воды, запас которых и должен быть выяснен, иначе освоение огромных районов встанет под сомнение. Вот почему на всяких исследованиях Севера нужно настаивать и осуществление их привествовать, в том числе и в особенности исследования на воду. Возможно, что выяснятся районы, где затруднения с водой будут отсутствовать.

Особенностью гидрологии как всей области вечной мерзлоты, так в усиленном размере северной ее части является лед в толщах вечно-мерзлой почвы, как постоянная составная часть этих толщ.

Установленный нами *закон подвижного равновесия* между количеством грунтовой воды в жидком виде, с одной стороны, и характером вечной мерзлоты — степенью ее географической непрерывности, ее мощностью и температурой — с другой — приложим полностью и к Северу.

Дело в том, что вода в жидком виде, исключая переохлажденное ее состояние, является носительницей положительных температур, вечная же мерзлота — носительницей отрицательных температур. Таким образом, между водой в жидком виде и вечно-мерзлой почвой по самому существу имеется глубокий антагонизм состояний: вода, отдавая свою тепловую энергию вечно-мерзлой почве, стремится вывести ее из мерзлого состояния; вечная мерзлота, поглощая тепловую энергию воды, стремится превратить ее из жидкого тела в твердое — лед. Суровые условия климата, господствующие на севере СССР, в этой непрерывной борьбе между водой в жидком виде и вечной мерзлотой становятся на сторону последней. Изменения климата в ту или иную сторону сказываются на изменении температурных условий толщи вечной мерзлоты, а это в свою очередь — на изменении количества грунтовых вод в жидком состоянии. Пусть, например, температура слоя вечной мерзлоты понижается; тогда острова таликов среди вечной мерзлоты захватываются ею в части или полностью, количество грунтовых вод в жидком виде уменьшается, а в виде льда увеличивается; число рек, прекращающих течение зимой даже и речными наносами долины, также увеличивается. Если температура вечной мерзлоты повышается, указанные явления происходят в обратном порядке. Вот в чем состоит смысл закона подвижного равновесия для области вечной мерзлоты.

Лед в вечно-мерзлой толще встречается начиная от отдельных мелких кристаллов, едва заметных простым глазом и даже в лупу, до

мощных, в несколько десятков метров толщины, пластов. Лед составляет как бы своеобразную горную породу, слагающую наравне с другими вечно-мерзлую толщу. В этом случае гидрология переплетается с геологией.

На Севере имеются обширные пространства, где ледяные пласты в почве отличаются особенной мощностью. Сюда относятся, во-первых, Новосибирские острова, затем — побережье Северного Ледовитого океана к западу и востоку от устья р. Лены, затем — водораздел Лена — Алдан в низовьях Алдана, затем — на Вилюе. На Крайнем Севере мощные пласты льда покрыты очень тонким, местами меньше метра, слоем современных отложений. Пласты или линзы льда мощностью от полуметра до двух метров всюду довольно частое явление.

По происхождению различают следующие главнейшие виды льда в мерзлой почве (не считая очень мелких прослоек):

1. Погребенный лед ледников. К этому виду относятся льды Большого Ляховского острова, Хапташинского и Оегосского яров и в других местах.

2. Лед, образовавшийся из воды, замерзавшей в трещинах почвы, встречается сравнительно часто.

3. Лед из засыпанных минеральным субстратом снежных масс.

4. Озерный лед, занесенный наносами. О таком случае говорит Врангель.

5. Наледный лед, занесенный наносами; довольно частое явление.

6. Речной лед, выброшенный на берег и занесенный наносами. Река может отойти на другое место долины, и погребенный речной лед может оказаться вдали от современной реки, а в древних речных отложениях — и много выше современной реки.

Перейдем теперь к рассмотрению так называемых наледных явлений, столь интересных с теоретической стороны и столь важных для практической жизни. Наледные явления самых различных форм есть результат сложных процессов, происходящих преимущественно в деятельном слое во время его замерзания. Слой вечной мерзлоты служит подстилающим водонепроницаемым слоем. Наличие воды в деятельном слое в процессе его промерзания есть необходимое условие для образования наледных явлений. Наледные явления вызывают различные деформации в верхних слоях почвы, выражающиеся в поднятиях почвы, иногда незаметных на глаз, иногда достигающих 2—4 метров высоты, в виде бугров-курганов. Обычно наледные явления имеют меньше чем годовой цикл своего развития и замирания. Но в отдельных случаях цикл развития выражается многими годами, и тогда бугры достигают 30—40 м высоты, так как годовые процессы роста бугров налагаются друг на друга (булгунняхи Якутии). Иногда через трещины в буграх или через кратероподобные отверстия во льду выливаются на дневную поверхность почвы огромные количества воды, замерзающей на больших площадях около бугров в виде ледяных полей.

Теоретически говоря, наледные процессы могут образовываться и вне области вечной мерзлоты при благоприятных для этого условиях, т. е. при наличии воды в верхних слоях почвы, подстилающего водонепроницаемого слоя в виде ли глины, в виде ли каменной породы и, наконец, достаточной глубины промерзания почвы. И действительно, мы имеем наледные явления и вне области вечной мерзлоты, но они чрезвычайно распространены именно в области вечной мерзлоты, где и климат более чем достаточно суров и вечно-мерзлый пласт всюду на

небольшой глубине лежит водонепроницаемым подстилающим слоем. Достаточно, следовательно, в области вечной мерзлоты иметь наличие надмерзлотной воды, чтобы были налицо все условия для наледных процессов.[1]

В упомянутой выше работе Хмызникова о гидрологии р. Яны есть много указаний на наледи; в общем составляется представление, что в верхней части бассейна р. Яны наледей значительное количество, но период их деятельности не распространяется на всю зиму: наледи, как говорят, замирают среди зимы.

Со стороны использования воды наледей для водоснабжения очень важно знать, действуют ли данные наледи всю зиму, не прекращаясь, или нет. В первом случае наледной водой можно пользоваться всю зиму и, разумеется, все лето, т. е. круглый год; вопрос состоит только в количестве воды. Во втором случае ясно, что наледь имеет ограниченное питание и для водоснабжения мало пригодна.

Мы выше говорили о необходимости изучения грунтовых вод Севера. Как известно, в значительной части изучение грунтовых вод в области вечной мерзлоты сводится к изучению наледей, так как они служат индикаторами и на существование и на количество грунтовых вод.

До самого последнего времени изучение наледных явлений состояло в описаниях их и в построении теорий их образования на основании полевых наблюдений. Лабораторные исследования начались, можно сказать, в самые последние годы и дали весьма интересные результаты. Выяснилось, по опытам Тебера и других за границей, по опытам М. И. Сумгина и других в СССР, что влажность мерзлого грунта есть функция его промерзания, т. е. мороз не фиксирует, не закрепляет только влагу в грунте в данной точке, а перераспределяет эту влажность так, что после промерзания может усилиться влажность в тех слоях, где она была незначительной, и наоборот. В природных условиях такое перераспределение может происходить в грандиозных масштабах.

В результате наледных процессов получаются следующие разновидности наледных явлений:

1) обыкновенное пучение грунта; 2) пятна-медальоны; 3) торфяные бугры; 4) выливание воды на поверхность льда рек и речек; 5) образование бугров льда на реках с выливанием и без выливания воды из бугров; 6) выливание грунтовой воды на дневную поверхность почвы без образования бугров; 7) образование бугров грунтовых наледей с выливанием и без выливания воды на дневную поверхность почвы; 8) булгунняхи; 9) явления недостаточно еще выясненные, например, могильные мари и некоторые другие. Так как процесс образования всех этих явлений происходит зимой, то в тех случаях, когда вода выливается наружу, образуются, как и указывалось выше, около наледных бугров пространства, покрытые льдом. Строение наледного льда резко отличается от строения обычного речного или озерного ледяного покрова своей слоистостью, белесоватым цветом от содержащихся в нем многочисленных пузырков воздуха. Иногда среди слоев льда попадаются прослойки снега и песка, который водой выносится на дневную поверхность.

Мы не будем приводить морфологических описаний различных наледных явлений, отсылая читателя к специальной литературе, где

[1] В тех случаях, когда зимняя мерзлота сливается с вечной.

это сделано достаточно подробно.[1] Остановлюсь лишь на существующих теориях образования деформаций поверхности почвы, часто выражающихся в буграх той или иной величины.

При современном состоянии науки о мерзлых грунтах и, в частности, о вечной мерзлоте следующие процессы приводят к образованию деформаций почвы.

Во-первых, переход воды в парообразном состоянии из талых слоев к мерзлым, замерзание этой воды с образованием прослоек льда, обычно тонких. Поднятие дневной поверхности почвы при этом незначительное.

Во-вторых, заполнение на принципе капиллярности водой в жидком виде — возможно в переохлажденном состоянии — пор замерзания, могущих образовываться в промерзающих слоях почвы. Идею эту выдвинул в восьмидесятых годах прошлого столетия инж. Штукенберг. При замерзании грунта находящаяся в нем вода, превращаясь в лед и расширяясь при этом, не всегда умещается в порах грунта, раздвигает их, образуя таким образом в мерзлом грунте мельчайшие трещины. В эти трещины снизу, из незамерзшего еще грунта, благодаря силам капиллярности, поднимается вода, если она в талом грунте имеется и соединена с неглубоко залегающей грунтовой водой. Вошедшая в поры замерзания вода замерзает, образуя новые поры замерзания, в которые опять входит вода и вновь замерзает, образуя поры и т. д. В результате получается вспучивание почвы в виде некоторого объема бугра.

Штукенберг изобразил процесс в виде формулы:

$$v = 1{,}09\,(a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + an) = 1.09 \sum_{i=1}^{i=n} a_1,$$

где

a_1—объем воды, бывший первоначально в грунте до его замерзания.
a_2 — объем воды, вошедший в первые поры замерзания
a_3 — „ „ „ во вторые „ „
an— „ „ „ в n'ые „ „
1,09—объем единицы воды, превратившейся в лед
v — объем льда в образовавшемся бугре пучения

Если $a_1 > a_2 > a_3 > \ldots an$, т. е. объемы воды, входящие в поры замерзания, идут в уменьшающемся порядке, образование бугра идет медленно.

Если же $a_1 < a_2 < a_3 \ldots < an$, т. е. объемы воды, входящие в поры, с каждым разом все увеличиваются, образование бугра идет интенсивно.

Но и в этом случае поднятие дневной поверхности почвы не бывает значительным — порядка до 50 см.

В третьих, деформации почвы с образованием бугров могут происходить от напряжений в грунтах, когда замерзающая в почве и расширяющаяся при этом вода или совсем не имеет внутренних ресурсов к расширению, или внутренние ресурсы к расширению недостаточны для приращения объема, получающегося от перехода жидкой фазы воды в твердую. При благоприятных условиях приращение объема создает напряжения внутри грунта и заставляет незамерзшую еще часть воды (а иногда и плывунные массы) передвигаться в сторону наименьшего

---

[1] Имеются прекрасные описания наледей у Мидендорфа, Майделя, Подъяконова.

сопротивления. В точке наименьшего сопротивления грунта образуется его поднятие, превращающееся часто в бугор значительных размеров. Эта теория была видвинута Сукачевым, поддержана рядом исследователей и облечена М. И. Сумгиным в математическую форму.

Возьмем теоретический случай. Представим себе, что зимнее промерзание почвы на некоторой площади идет неравномерно и что края этой площади успели промерзнуть полностью и соединиться с вечной мерзлотой, а в средине имеется еще некоторый слой талика, переувлажненного так, что вода при обращении в лед не имеет внутренних ресурсов к расширению. Следовательно, при дальнейшем промерзании этого талика приращение объема будет создавать напряжения в грунте, которые проявятся в деформациях. Деформации могут происходить только вверх, так как снизу находится вечно-мерзлая почва, а с боков — зимняя мерзлота. Изгиб почвы вверх и будет началом бугра, бугор этот может в дальнейшем дать трещину, через которую будет выливаться вода на дневную поверхность, если вода имеется в избытке в почве (при наличии грунтовых вод).

Если мы представим, что наш замкнутый талик имеет форму круга с радиусом R, что он до начала деформации почвы промерз на глубину H, то от дальнейшего промерзания до глубины H' приращение объема v от перехода воды в лед выразится формулой:

$$v = \frac{0{,}09 \cdot mp\pi R^2(H' - H)}{100},$$

m — весовая влажность слоя грунта толщиной $H' - H$

p — вес см³ почвы этого слоя в сухом состоянии

0,09 приращение объема см³ воды при переходе в лед.

Это приращение объема создаст бугор деформации, *равный ему по объему.*

Пусть бугор имеет форму конуса с основанием радиуса r и высотой h. Тогда объем этого конуса V равен

$$V = \frac{\pi r^2 h}{3}$$

Но по сказанному выше $V = v$ или, подставляя соответственные величины и освобождая от знаменателей, получаем *формулу бугра:*

$$V \cdot 0.0027 \cdot mpR^2(H' - H) = r^2 h \qquad (1)$$

Перенося известные величины в одну сторону, а неизвестные — в другую и положив

$$\frac{r^2 h}{0{,}0027mp} = B,$$

получим уравнение (1) в таком виде:

$$R^2(H' - H) = B \qquad (1')$$

Из этого уравнения мы можем определить или R через $(H' - H)$, получая

$$R = \sqrt{\frac{B}{H' - H}} \qquad (2)$$

или $H' - H$ через R, получая

$$H' - H = \frac{B}{R^2}.$$

Так как R обозначает радиус той площади, водоносные слои которой участвуют в образовании бугра, то, зная R, мы будем знать площадь, участвующую в пучинообразовании; $(H' - H)$ обозначает ту толщу промерзшего грунта, которая непосредственно влияет на образование бугра в нашем теоретическом случае.

Собственно, мы в нашем случае имеем одно уравнение с двумя неизвестными, но одно из них, именно $H' - H$ не трудно определить или непосредственным измерением, или в виде вывода из других измерений и наблюдений. Тогда мы легко определяем R по формуле (2).

Зная радиус площади, образующей бугор, мы можем какое-либо сооружение или отнести вне этой площади, или предпринять борьбу с наледным явлением методом, соответствующим данному случаю.

Исследуя уравнение (1′) мы можем заключить, что величина бугра возрастает прямо пропорционально $H^1 - H$, т. е. толщине слоя грунта, вызывающего образование бугра, и прямо пропорционально квадрату радиуса этой площади. Если $H' - H$ равно нулю, т. е. если $H' = H$, что означает, что промерзание не затронуло водоносного слоя, то R из формулы (2) равно бесконечности, что означает, что бугра не образуется— это может быть или в исключительно теплые зимы при нормальном снежном покрове для данного места, или же в исключительно снежные зимы при обычной температуре зимы.

Если H равно нулю, то формула (1′) выразится формулой:

$$R^2H' = B$$

Это означает, что бугор наледи начинает образовываться с момента начала промерзания почвы. В природных условиях это будет тогда, когда водоносный слой начинается с поверхности почвы.

В природных условиях мы, разумеется, найдем большое разнообразие во всех величинах, входящих в наше основное уравнение (1). Но наш теоретический анализ может служить руководящей нитью для понимания отдельных бугров наледей.

И, наконец, в-четвертых, причиной наледных бугров может быть гидростатическое давление воды в реках, речках и ручьях при наличии напора, получившегося в результате зимнего промерзания в каком-либо месте русла потока, причем промерзание потока может быть полным или частичным. Промерзание вызывает уменьшение живого сечения потока, что и создает подпор; подпор вызывает напряжения, а напряжения создают деформации или льда реки, или наносов ее долины. Эту теорию выдвинул в начале текущего века инженер Подъяконов, давший такую схематическую формулу именно для речных наледей.

$$R \sim P \frac{c}{d} Q \frac{a}{M+N},$$

R — степень развития наледи,
P — сила морозов,
c — теплопроводность наносов,
d — толщина снежных наносов,
Q — дебит потока,
a — ширина долины,
M — живое сечение наносов,
N — живое сечение русла реки или речки.

При $M = 0$ и $N = 0$ одновременно вся вода потока становится наледью. Высота наледного льда в отдельных случаях является пока-

зателем высоты напора воды, образующей наледь. Обычно в виде наледи выливается только часть воды потока, часть же продолжает течение или по руслу над льдом, или же наносами, как под дном, так и в ее долине.

Таковы теории, объясняющие наледные явления. Но нужно сказать, что первая теория выработана для объяснения пучинообразования вне районов вечной мерзлоты, вторая же и третья — преимущественно для южных частей области вечной мерзлоты, хотя идеи третьей теории Сукачевым и М. И. Сумгиным применяются и к образованию пятен-медальонов на Севере. Сумгин под свою теорию объединил все разновидности наледных явлений, обобщив их таким образом одной идеей их генезиса. Для некоторых речных наледей теория Подъяконова также может быть применена на Севере.

Тем не менее необходимо отметить, что Север имеет свои особенности, которые могут внести некоторые изменения, если не по существу, то в частности, в упомянутые теории. Главнейшей из особенностей Севера по отношению к наледным явлениям нужно считать малую мощность деятельного слоя, что при суровости климата вызывает быстрое промерзание деятельного слоя.

Наледи грунтовых вод в южных частях с их буграми имеют, за редкими исключениями, годовой цикл развития. Между тем на Севере распространены типы наледных явлений с многолетним циклом развития — торфяные бугры и булгунняхи. Все это говорит за то, что на Севере должны быть поставлены специальные исследования наледных явлений, и не экспедиционного типа, а стационарного.

Пятна-медальоны хотя и распространены во всех широтах и долготах области вечной мерзлоты, но преимущественное развитие имеют также на Севере. Они также заслуживают специального изучения.

Изучение разного рода наледных явлений имеет помимо теоретического и большой практический интерес, так как оно поможет нам понять процессы, совершающиеся в деятельном слое во время его промерзания и оттаивания, а также укажет и на грунтовые воды.

Было бы, однако, крайне ошибочно при изучении гидрологии сосредоточить все внимание только на наледных явлениях, как бы они ни были эффектны, вроде Кыра-Нехаранской наледи, занимающей своим льдом площадь более 100 км². Необходимо изучать и ту почвенную влажность, которая имеется и в деятельном слое и в слое вечной мерзлоты в виде мелких кристаллов льда, так как та и другая влажность имеет большое практическое значение, о чем говорится более подробно в статье В. К. Яновского.

Всякий неизбежно спросит: когда и как мог образоваться столь мощный слой мерзлой почвы с его пластами льда в грунте, с булгунняхами, наледными полями и с своеобразным ландшафтом, порожденным вечной мерзлотой?

Многим знакомым с суровостью климата Севера прежде всего придет мысль, что вечная мерзлота есть результат современных суровых климатических условий. Действительно, как увидим ниже, современный климат Севера суров.

Мы ограничимся лишь самыми краткими данными, притом о самых главнейших климатических элементах, интересных с точки зрения вечной мерзлоты, именно с данными о температуре воздуха, осадков, где возможно, о снежном покрове. Температуру воздуха дадим за июль, январь и за год.

Приводим несколько таблиц:

Температура воздуха на некоторых островах Северного Ледовитого океана

Станции	Январь	Июль	Год
Малые Кармакулы . . .	—15,7	6,4	—6,0
Маточкин Шар	—20,3	5,3	—8,5
Вайгач	—18,8	5,3	—7,2

Температура воздуха области вечной мерзлоты от Уральского хребта до низовьев Енисея включительно

Станции	Январь	Июль	Год
Салехарт (б. Обдорск) .	—25,6	13,8	— 7,0
Березов	—23,6	15,7	— 4,2
Остров Диксона	—28,0	3,2	—12,7
		Август 4,3	
Дудинка	—30,2	12,7	—10,9
Туруханск	—28,4	15,9	— 7,8

Температура воздуха области вечной мерзлоты к востоку от р. Енисея

Станции	Январь	Июль	За год
Сагастырь	—36,5	4,9	—17,2
Русское Устье	—38,0	10,7	—15,4
Верхоянск	—50,1	15,5	—15,9
Якутск	—43,3	19,1	—10,7
Среднеколымск	—39,9	14,0	—13,0
Усть-Майское	—42,0	18,3	— 9,6

Из этих данных мы видим, что если в западной части до Енисея на побережье и на островах Ледовитого океана январь самый холодный месяц года и не имеет особенно низких средних температур, смягчаемых близостью моря, зато летние температуры исключительно низки. Это приводит к тому, что средние годовые дают низкую температуру.

К востоку же от Енисея зимние температуры побережья весьма понижаются, а летние не повышаются, что приводит к весьма низким годовым средним температурам. Континентальные станции дают исключительно низкие температуры, которые, несмотря на сравнительно теплое лето, в итоге дают низкие годовые средние. Здесь следует оговориться, что большинство метстанций находится в долинах, где зимою накапливается и застаивается холодный воздух. На горах же до известной высоты зимой теплее, чем в долинах, что подтверждают данные Семеновского рудника. Так, в 1918 г. наблюдались следующие средние месячные температуры воздуха в январе:

	Январь
Якутск	—40,0
Семеновский рудник . . .	—28,0

Семеновский рудник находится на высоте 1020 м, а Якутск 102 м над уровнем моря.

Перейдем к осадкам, которые распределяются следующим образом:

Станции	Годов. сумма осадков в мм	Число дней с осадками
Салехарт (б. Обдорск)	287	106
Березов	388	146
Дудинка	236	160
Туруханск	425	175
Русское Устье	151	107
Среднеколымск	174	107
Верхоянск	128	73
Якутск	187	103

Как видим, осадки области вечной мерзлоты, судя по нашим станциям, незначительны. Однако редкость метеорологических станций на севере Союза позволяет думать, что можно ждать среди области вечной мерзлоты Севера районов, где осадки в годовой сумме значительны, что мы и видим в Туруханске. В Енисейске, близком к массиву вечной мерзлоты, сумма годовых осадков равна 466 мм.

Перейдем к снежному покрову.

В Туруханске, на южной границе вечной мерзлоты, начало снежного покрова приходится в среднем на 25 сентября и конец — на 2 июня, что дает 241 день со снежным покровом. Высота снежного покрова в декабре 63 см, в январе 87, а в последней декаде марта и в первой апреля доходит до 109 см. Снежный покров на большой части территории Якутской АССР незначителен, что видно из помещаемой таблички.

Средняя высота снежного покрова (в см)

Станции	Декабрь	Январь	Макс. средний месячный
Булун	9	11	21 (апрель)
Казачье	9	12	15 (февраль)
Нижнеколымск	30	33	48 (апрель)
Родчево	30	38	49 (март)
Верхоянск	19	22	27 (март)
Якутск	16	26	37 (март)
Усть-Майское	21	28	38 (март)

На всей территории вечной мерзлоты севера СССР высота снежного покрова представляет довольно пеструю картину. Нужно сказать, что на метстанциях измеряют высоту снега на защищенных от ветра местах. Данные станций представляют, так сказать, идеальное распределение снега по территории, представляемой станцией. На самом же деле там, где имеются сильные зимние ветры, как, например, на побережье Ледовитого океана, снег в одних местах сдувается, в других надувается. Это меняет всю картину влияния снежного покрова на промерзание почвы, усиливая его на местах выдувания снега и уменьшая в местах снежных наметов или сугробов.

Как видим из этого краткого очерка, климат района вечной мерзлоты севера СССР суров по температурным условиям, и это справедливо даже для южных частей Севера в его восточной половине (за Енисеем). Осадков на большей части территории выпадает незначительное количество, большие пространства имеют малый снежный покров.

Все это наводит мысль на то, что современный суровый климат и есть причина наличия на Севере вечной мерзлоты. Однако есть не-

опровержимые данные, говорящие о том, что вечная мерзлота на Севере образовалась в отдаленные сравнительно времена, а именно: или на границе смены третичной эпохи на четвертичную, или в начале четвертичной в ледниковую эпоху. Эти данные заключаются в многочисленных находках на территории Севера частей или целых трупов вымерших животных — мамонтов и носорогов, с хорошо сохранившимся мясом этих животных. Территория, на которой находились трупы этих животных, с запада на восток простирается примерно на 80°, а с севера на юг — на 12°. Если же учесть погребенные трупы китов на Ямале, то протяжение места находок должно еще увеличиться.

Для каждого из пунктов, где найдены сохранившиеся остатки неразложившихся трупов упомянутых животных, мы можем с достоверностью утверждать, во-первых, что в этом пункте в момент смерти животного грунт или уже находился в состоянии вечной мерзлоты, или же она в этот момент образовывалась столь энергично, что труп не успел разложиться; во-вторых, что грунт непрерывно оставался мерзлым с момента смерти животного до находки его неразложившегося трупа и, в-третьих, что грунт был мерзлым в момент находки неразложившегося трупа (в этом мы убеждаемся непосредственным наблюдением). Следовательно, на месте нахождения трупов указанных животных вечная мерзлота несомненно образовалась в достаточно отдаленные от нас времена. Но этот вывод мы можем распространить на всю территорию, где найдены неразложившиеся трупы указанных животных, а следовательно и на весь север СССР. Таким образом, на вопрос: — когда? — мы ответили с достаточной ясностью. На вопрос же: как образовалась вечная мерзлота? — мы при современном состоянии учения о вечной мерзлоте ответить не можем. Какова же роль современного климата по отношению к вечной мерзлоте? Теоретически говоря, современный климат может быть: а) одинаковым с тем, при котором вечная мерзлота образовалась; б) суровее и в) теплее того климата.

В первом случае современный климат только поддерживает режим вечной мерзлоты, образовавшейся когда-то давно. Во втором случае усиливает вечную мерзлоту, а в третьем случае — мы имеем ее деградацию. Какой из этих трех случаев мы имеем в наши дни, пока мы точно сказать не можем, так как не знаем условий климата времени зарождения вечной мерзлоты, но имеем некоторые данные предполагать, что наш климат несколько теплее того климата, при котором образовалась вечная мерзлота. Итак, возраст вечной мерзлоты на Севере в грубых чертах нам известен; детали подлежат дальнейшему изучению.

На этом мы кончаем эту небольшую сводную работу о вечной мерзлоте Севера. Мы хотели здесь дать только общую характеристику описываемого предмета. Поэтому нами не давались подробные описания явлений, не давалось подробного анализа их и это тем более, что на нашу статью мы смотрим как на введение к статьям тт. Яновского, Цытовича и Толстихина, которые вместе с нашей составляют одно целое, представленное в виде докладов на первой конференции по Северу Главсевморпути Комиссией по изучению вечной мерзлоты Академии наук.

Мы уверены, что читатель из краткой предлагаемой статьи увидит всю важность значения вечной мерзлоты в деле освоения Севера, увидит малую изученность этого феномена, а следовательно представит себе всю ту огромную работу, которая стоит перед нами по изучению вечной мерзлоты на обширнейших пространствах севера СССР.

Однако мало сказать, что такой-то предмет нужно изучать, — следует сказать, как изучать и в каком направлении вести это изучение.

По нашему мнению, в изучении вечной мерзлоты мы переживаем такое время, когда ограничиться одними экспедициями невозможно, необходимы стационарные наблюдения, а следовательно — специальные мерзлотные станции. Мы высказываемся за то, чтобы стационарные исследования превалировали над экспедиционными. Такой мощной организации, как Главсевморпуть, подсильно устроить специальные станции и обеспечить их работниками, сменяемыми через известные промежутки времени.

Необходимо разработать для всего Севера сеть станций и порядок их осуществления. При выработке сети станций, по нашему мнению, следует руководствоваться правилом: меньше станций, но прекрасно оборудованных приборами, хорошо снабженных и обеспеченных квалифицированным персоналом.

Было бы ошибкой, если бы мы на таких станциях разрешали только узко практические задачи. Необходимо поставить на разрешение ряд основных теоретических проблем, связанных с вечной мерзлотой. Сюда относится постановка полных актинометрических наблюдений (с самописцами, с абсолютным прибором Онгстрема, с изучением альбедо и т. д.). Сюда относится определение глубины залегания нулевой годовой амплитуды, геотермической ступени, значения нулевой завесы.

В то же время на фоне этих теоретических вопросов на станциях ставятся чисто практические задачи по строительству, сельскому хозяйству и лесоводству. В частности, вопросы тепловой мелиорации, в которые входит изучение влияния на тепловой баланс в области вечной мерзлоты мохового покрова, палов. Одной из прикладных тем должно быть изучение режима влажности деятельного слоя.

Мы не пишем здесь программы работ станций, а только даем принципиальные установки для таких программ. Так, наблюдения за разными объектами необходимо поставить таким образом, чтобы практик-строитель мог произвести нужные ему теплотехнические расчеты, а сельскохозяйственник — свои расчеты по культуре растений.

Экспедиционные исследования, говорим мы, должны быть на втором плане. Это не значит, что их нужно забросить, а значит, что их нужно ввести в определенное русло. В задачи экспедиционных работ должны входить рекогносцировочные исследования мало изученных районов; специальных экспедиций с этой целью устраивать не следует, так как рекогносцировки мало дают при современных требованиях к научным работам. Но такие исследования следует производить при других исследованиях Севера — геологических, гидрогеологических, промышленно-разведочных и др., без затраты на это дело больших средств.

Но по ряду специфических вопросов нужно будет снаряжать специальные экспедиции. Нам рисуются экспедиции по изучению следующих объектов:

1) погребенных льдов — для выяснения их генезиса;

2) булгунняхов — поставив в этом деле основной задачей: есть ли булгунняхи результат динамических процессов в почво-грунтах или это какие-либо другие образования (например, останцы);

3) незамерзающих зимой рек;

4) крупных наледей;

5) термических разрезов через долины,

6) и других вопросов, которых мы здесь не перечисляем.

Нужно предвидеть, что экспедиции для разрешения подобных вопросов потребуют значительных средств, так как они связаны будут с относительно большим бурением, с передвижением на огромных пространствах.

Наконец, третий источник наших знаний о вечной мерзлоте Севера — это различные разведки промышленного характера. Материалы, полученные таким образом, бывают иногда малоценны, так как получаются они попутно, но если бы в большие разведочные партии посылать специального человека для собирания материалов по вечной мерзлоте, то и от разведочных партий мы получили бы немало ценного.

Заключаем мы свою статью положением, которое является, по нашему мнению, основным: исследования должны итти впереди освоения Севера; средства, затраченные на научные работы, будут многократно возмещены тем, что при последующем освоении края будет сделано меньше ошибок, а следовательно и меньше напрасно израсходованных средств.

Прожектор науки должен освещать путь на север промышленности, сельскому хозяйству и лесоводству.

ПРОФ. С. С. КОВНЕР

К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОМЕРЗАНИЯ

1. Мы остановимся в настоящем докладе на одном из самых простых и в то же время крайне мало исследованных и теоретически и экспериментально вопросов, связанных с промерзанием.

Дело идет о простейшей схеме процесса промерзания.

Несмотря на всю простоту и схематичность поставленной проблемы, современная математическая физика не знает[1] точного решения задачи, формулирующейся так: имеется конечная область, заполненная однородною жидкостью, которая подвергается переменному температурному режиму на границе. Если эта наружная температура ниже точки замерзания жидкости, то возникает процесс промерзания этой жидкости. Спрашивается: при данной форме граничной поверхности и данной (меняющейся со временем) температуре этой поверхности какова будет температура каждой внутренней точки в каждый момент времени? В частности, как будет двигаться внутрь поверхность, отделяющая жидкую среду от твердой, какова форма этой поверхности промерзания («нулевой завесы» по выражению М. И. Сумгина) и какова скорость этого процесса?

Если бы дело шло только о распределении температуры, то задача до конца решалась бы классическими методами Fourier. Вопрос осложняется тем, что на границе между твердым и жидким слоем происходит выделение скрытой теплоты плавления. Этот факт вводит новое граничное условие, значительно затрудняющее математическое решение задачи.

Единственное известное в науке точное решение этой задачи получено J. Stefan'ом в 1889 г. Оно разбирало самый простой случай — постоянной температуры на границе бесконечного однородного слоя — и было применено автором к вопросу о таянии льдов в полярных морях.[2]

Нами были составлены интегро-дифференциальные уравнения, необходимые для отыскания полного решения этой задачи. Даже в простейших предположениях задача приводится к системе 3 нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, не дающих оснований надеяться на получение точного решения в сколько-нибудь удобной форме. Поэтому важное значение получают попытки отыскать достаточно удобные приближенные методы для решения этой задачи.

---

[1] Marcel Brillouin. Sur quelques problèmes non résolues de la physique. mathématique classique. Propagation de la fusion. Ann. lünst. Poincaré t. 1. 1931, pp. 285—3 8.

[2] J. T. Stefan. Über einige Probleme der Theorie der Wärmeleitung. Sitz. Ber. Ak. Wiss. Wien, 1889, стр. 473—484.

Наиболее удачным по простоте идеи и возможности легкого применения является прием, предложенный Л. С. Лейбензоном[1] и примененный им к задаче о промерзании трубопровода.

В свое время нами была проведена работа по распространению метода Л. С. Лейбензона на случай двух измерений.[2]

В то же время обращает на себя внимание отсутствие в литературе решения этой задачи для конечной области.

В настоящем докладе мы и даем решение методом Л. С. Лейбензона задачи о промерзании и протаивании шара. Достоинство применения этого метода состоит, с одной стороны, в его полной элементарности, почему его и нужно пропагандировать среди практиков, с другой стороны — в том, что полученное решение дает хотя и приближенную, но весьма детально разработанную и легко обозримую до конца картину процесса. Кроме того, мы даем здесь также и теоретическую оценку погрешности этого метода.

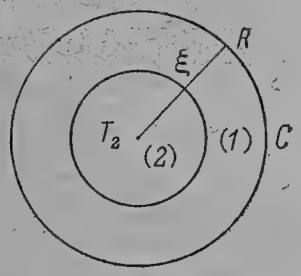


Рис. 1.

2. Если сфера радиуса R, наполненная однородною жидкостью, неподвижная и находящаяся при постоянной температуре T_2, погружена в среду, температура которой постоянна и равна C, причем

$$T_2 > Q > C,$$

где Q есть температура точки замерзания, то процесс охлаждения определится из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\left\{\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin\vartheta}\frac{\partial u}{\partial \vartheta}\left(\sin\vartheta \frac{\partial u}{\partial \vartheta}\right) + \frac{1}{r^2 \sin\vartheta}\frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2}\right\},$$

которое в данном случае принимает вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\left\{\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right\} \tag{1}$$

Через время t после начала процесса сферический слой толщины $R - \xi$ затвердеет, на границе же сферы радиуса ξ будет происходить процесс промерзания, состоящий в освобождении тепловой энергии плавления.

Если через λ обозначить коэффициент теплопроводности застывшего слоя, через c_1 его удельную теплоту, через S_1 — плотность и u_1 температуру, теми же буквами с индексом 2 те же величины в жидкой области[2] (см. рис. 1), то на границе сферы радиуса $r = \xi$, которая за время dt продвинулась внутрь на $-d\xi$, поток тепла, являющийся следствием теплопроводности, равен на единицу поверхности

$$-\lambda_2\left(\frac{\partial u_2}{\partial r}\right)_{r=\xi} dt.$$

К этому прибавляется освободившееся благодаря примерзанию количество тепла

$$-k\rho_2 d\xi,$$

---

[1] Л. С. Лейбензон. Руководство по нефтепромысловой технике. ОНТИ, 1931, стр. 144—149.

[2] С. С. Ковнер. Об одной задаче теплопроводности. Журнал Геофизики, III, вып. I, стр. 32—41.

где

k — скрытая теплота плавления. Сумма этих потоков передается наружу по твердому слою (1), где имеет вид

$$-\lambda_1\left(\frac{\partial u_1}{\partial r}\right)_{r=\xi} dt.$$

Приравнивая, получаем на границе промерзания условие J. Stefan'a в форме:

$$\left[\lambda_1\frac{\partial u_1}{\partial r}-\lambda_2\frac{\partial u_2}{\partial r}\right]_{r=\xi}=k\rho_2\frac{d\xi}{dt} \qquad (2)$$

Идея приближенного решения, предложенная Л. С. Лейбензоном для задач этого рода, состоит в том, что скорость процесса промерзания находится из условия (2) в предположении, что в жидкой сфере и твердом сферическом слое тепловой поток имеет стационарный характер. Это предположение сразу дает:

$$U_2=\text{Const}=T_2.$$

Температура u_1 найдется из диференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial u}{\partial r}=0$$

при граничных условиях

$$u_1(\xi)=Q;\ u_1(R)=C$$

и будет иметь форму:

$$U_1=\frac{(Q-C)R}{R-\xi}\left(\frac{\xi}{r}-1\right)+Q.$$

Подставляя в условие (2)

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial r}\right)_{r=\xi}=-\frac{1}{\xi}\frac{(Q-C)R}{R-\xi}$$

и

$$\frac{\partial u_2}{\partial r}=0,$$

получаем его в форме:

$$-\frac{\lambda_1}{\xi}\frac{(Q-C)R}{R-\xi}=k\rho_2\frac{\partial\xi}{\partial t}.$$

Интегрирование этого условия дает зависимость ξ от t в форме:

$$-\frac{\lambda_1}{k\rho_2}(Q-C)Rt+B=\frac{R^2}{2}-\frac{\xi^3}{3}$$

Произвольная константа B определится из условия, состоящего в том, что при $t=0$ $\xi=R$. Окончательно получаем:

$$-\frac{\lambda}{k\rho_2}(Q-C)Rt=-\frac{1}{6}(2\xi+R)(\xi-R)^2$$

или

$$t=\frac{\alpha^2}{R}(2\xi+R)(\xi-R)^2 \qquad (3)$$

где

$$\alpha^2=\frac{k\rho_2}{6\lambda_1(Q-C)}.$$

Кривая имеет следующий характер (см. рис. 2).

Что дает, для интересующей нас обратной зависимости, в интервале от начала до окончания процесса промерзания (см. рис. 3).

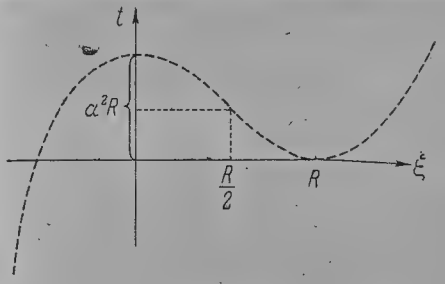


Рис. 2.

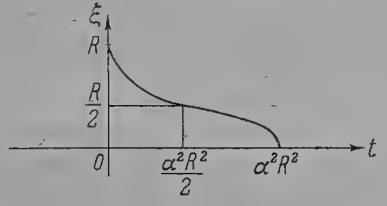


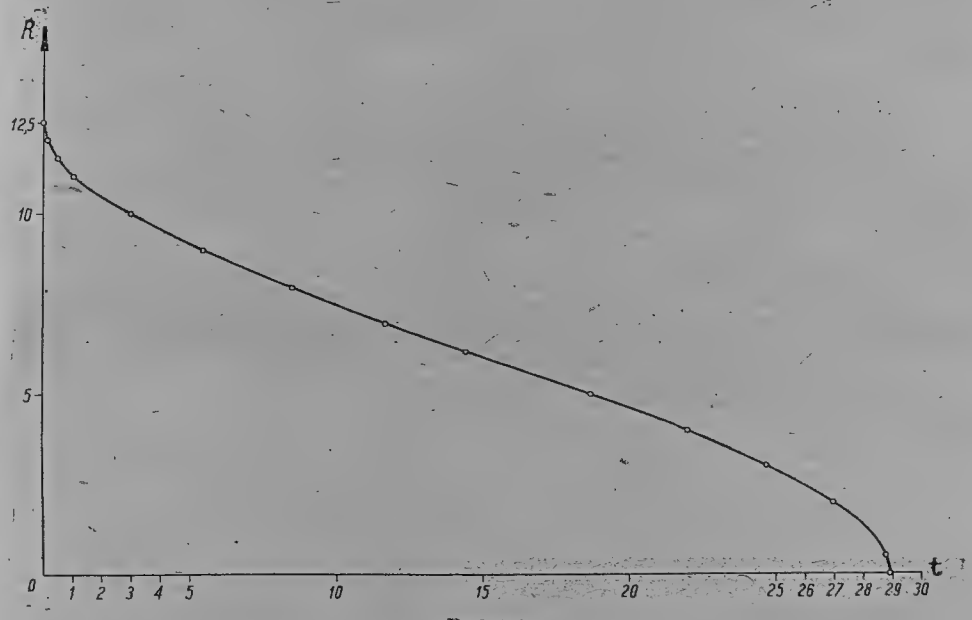
Рис. 3.

Любопытно сопоставить найденное время полного промерзания сферы

$$t_{\text{шар}} = \alpha^2 R^2 = \frac{K\rho_2}{6\lambda_1(Q-C)} R^2 \qquad (4)$$

с найденным Л. С. Лейбензоном [1] временем полного промерзания цилиндрического трубопровода.

$$t_{\text{цил.}} = \frac{K\rho_2}{4\lambda_1(Q-C)} R^2.$$



Ри с. 4.

Это сопоставление показывает, что в сделанных предположениях, время полного промерзания шара относится к времени полного промерзания бесконечного цилиндра, как 2 : 3.

[1] Цит. раб., стр. 148.

Прилагаемый чертеж (рис. 4) дает ход промерзания сферы радиуса 12,5 см, наполненной водою, при наружной температуре $C = -4°$ C.

Константы соответственно равны:

$$\lambda_1 = 0{,}005$$
$$k = 80$$
$$s_2 = 1{,}00$$
$$Q = 0$$
$$C = -4°$$
$$R = 12{,}5$$

Время полного промерзания $\approx$ 28,9 часа.

В связи с этими результатами обнаруживается возможность простой экспериментальной проверки данного метода.

3. Вопрос о протаивании твердой сферы, прогреваемой снаружи, решается тем же приемом. В тех же обозначениях условие (2) принимает формально тот же вид:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial r}\right)_{r=\xi-} = \lambda_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial r}\right)_{r=\xi} = K\rho_2 \frac{\partial \xi}{\partial t}, \qquad (2)$$

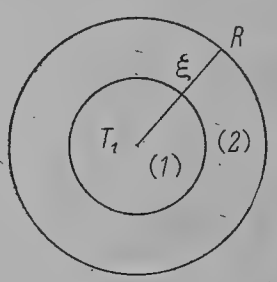


Рис. 5.

но знак каждого члена левой части в этом случае, когда

$$T \leqslant Q < C,$$

будет положителен, левая же часть попрежнему отрицательна.

В этом случае полагаем $u_1 = \text{Const.} = T_1$, а u_2 температура жидкого наружного слоя найдется из уравнения

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial u_2}{\partial r} = 0$$

при граничных условиях

$$u_2(\xi) = Q$$
$$u_2(R) = C$$

и будет иметь ту же форму, что u_1 прошлого решения

$$u_2 = \frac{(Q-C)R}{R-\xi}\left(\frac{\xi}{r} - 1\right) + Q,$$

будучи же подставлено в условии (2), приведет к нахождению зависимости положения границы промерзания от времени в форме

$$t = \frac{\beta^2}{R}(2\xi + R)(\xi - R)^2,$$

где

$$\beta^2 = \frac{\chi\rho_2}{6\lambda_2(C-Q)}$$

Отсюда следует, что при равной разности температур наружного и внутреннего слоя время протаивания твердой сферы на некоторую

толщину будет относиться ко времени промерзания жидкой на ту же толщину, обратно пропорционально коэффициентам теплопроводности наружного слоя. Так, например, время полного протаивания равно

$$t_0^1 = \beta^2 R^2$$

и отношение

$$t_{0\text{промерз}} : t_{0\text{ оттаив}}^1 = \frac{1}{\lambda_1} : \frac{1}{\lambda_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

что и естественно.

Следовательно, процесс протаивания льда, идет медленнее, чем процесс промерзания, при прочих равных условиях, как $\lambda_1 > \lambda_2$

Здесь, однако, уместно указать, что в то время как при изучении явления промерзания можно было без значительного ущерба пренебречь явлением расширения воды при промерзании, в случае оттаивания это явление заставит твердое ядро всплыть, что изменит граничные условия задачи. Этот факт необходимо учесть при возможных геофизических приложениях настоящей работы и ее экспериментальной проверке.

4. Из изложенного ясно, что принятый нами приближенный метод

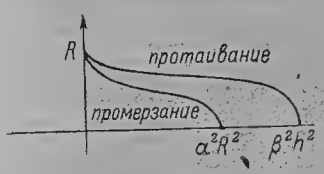


Рис. 6.

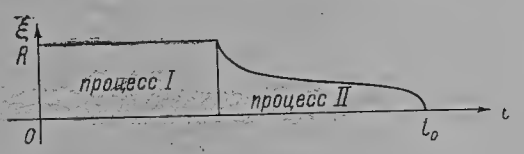


Рис. 7.

решения будет тем ближе к истине, чем меньше отличается температура внутреннего слоя (мы для простоты будем говорить только о промерзании) от температуры плавления Q. Поэтому, в случае начальной температуры внутреннего жидкого слоя равной T_2, мы получим *верхнюю оценку*, если будем мыслить физический процесс промораживания как распадающийся на две стадии, а именно 1-я стадия: сфера радиуса R при внутренней температуре T_2 и наружной Q, остывает до Q; 2-я стадия — после этого начинается процесс промерзания.

Ясно, что время, полученное из расчета первого процесса, плюс время, полученное из расчета второго, будет больше истинного времени промерзания, так как в действительности радиус ξ все время убывает. Вот почему мы имеем в этом случае верхнюю оценку.

Графически наше предположение сводится к следующей схематизации процесса: (см. рис. 7)

Таким образом, задача о времени, например, полного промерзания сферы сведется к нахождению времени t_1, охлаждения сферы от температуры T_2 до температуры Q; к этому нужно будет прибавить время

$$t_0 = \alpha^2 R^2$$

из формулы (3).

5. Время t_1 мы найдем из решения задачи об охлаждении сферы, имеющей начальную температуру T_2 и температуру Q на границе. Эта

задача решается без труда классическими методами. Температура $u(r, t)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial t} \right\} \tag{5}$$

при начальном условии

$$u(r, o) = T_2$$

и граничном

$$u(R, t) = Q$$

Решение имеет вид:

$$u(r, t) = \frac{2(T_2 - Q)R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} e^{-\frac{a^2 n^2 \pi^2}{R^2} t} \frac{\sin \frac{n\pi}{R} r}{n} + Q$$

6. Мы найдем время t_1 из этой формулы, приняв во внимание то обстоятельство, что температура $u(r, t)$ достигает максимума, как показывает элементарный анализ, при $r = O$, т. е. в центре сферы. В центре температура будет следующей функцией времени:

$$u(o,t) = 2(T_2 - Q)\, R \sum_{n-1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} e^{-\frac{a^2 n^2 \pi^2}{R^2} t} \lim \frac{\sin \frac{n\pi}{R} r}{\frac{n\pi r}{R}} \cdot \frac{n}{R} + Q =$$

$$= 2(T_2 - Q) \sum_{n-1}^{\infty} (-1)^{n-1} e^{-\frac{a^2 n^2 \pi^2}{R^2} t} + Q$$

Она будет стремиться к Q при $t \quad \infty$, но весьма быстро.

Возвращаясь к разобранному примеру с водою, получаем, полагая:

$$T_2 = 4^\circ \mathrm{C}$$
$$\lambda_2 = 0{,}001$$
$$c_2 = 1{,}00$$
$$\rho_2 = 1{,}00$$
$$a_2 = \frac{\lambda_2}{C_2 \rho_2} = 0{,}001$$
$$Q = 0$$

Выражение для температуры в центре будет иметь вид

$$u_0 = 2\, T_2 \left\{ e^{-\frac{a^2 \pi^2}{R^2} t} - e^{-4\frac{a^2 \pi^2}{R^2} t} + e^{-9\frac{a^2 \pi^2}{R^2} t} \ldots \right\}$$

Ограничиваясь первым членом, находим, что время t_1, потребное на 1 процесс, при $u_0 = 0{,}01^\circ\, C \leqslant$ будет меньше, чем $t_1 \leqslant 29{,}09$ часа.

Таким образом, $t_1 \longleftrightarrow t_0 \longleftrightarrow$, и можно с большою уверенностью утверждать, что предложенные нами приближенные формулы расчета

времени промерзания сферы (3) и (4) справедливы с точностью до фактора ϑ, т. е. имеют вид

$$t = \vartheta \frac{\alpha^2}{R}(2\xi + R)(\xi - R)^2,$$

причем

$$1 \leqslant \vartheta \leqslant 2$$

Эти весьма простые формулы делают крайне желательной экспериментальную проверку пригодности всего метода Л. С. Лейбензона к решению задач этого типа.

В. К. ЯНОВСКИЙ

К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В ЦЕЛЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

I. ВВЕДЕНИЕ

Едва ли в настоящее время приходится доказывать необходимость и целесообразность специальных мерзлотных исследований в целях проектирования различного рода инженерных сооружений.

Строителям и исследователям, соприкасающимся с вечной мерзлотой, хорошо известно, что недоразумения и трудности, возникающие при строительстве, а затем и при эксплоатации сооружений, объясняются малым знанием строителями свойств и условий залегания талых и подстилающих их вечно-мерзлых пород, на которых возводится то или иное сооружение, а также процессов, совершающихся в этих породах. Одним словом, прочно и без дополнительных накладных расходов в период эксплоатации инженерные сооружения в области вечной мерзлоты могут быть возведены не только тогда, когда со всей тщательностью соблюдены технические правила их проектирования, но лишь, когда всесторонне и тщательно изучены строение и свойства тех естественных оснований (грунтов), на которых они возводятся.

Отсюда следует, что перед возведением всякого более или менее ответственного сооружения на вечной мерзлоте необходимы специальные мерзлотно-грунтовые исследования и что основной задачей таких исследований должно явиться тщательное изучение динамики вечной мерзлоты и явлений, с нею связанных, и гидротермического режима, характера и строения грунтов деятельного слоя и вечно-мерзлой толщи, являющихся в совокупности факторами, определяющими основные принципы строительства и эксплоатации сооружений на вечной мерзлоте.

Несомненно, что получение данных, необходимых для реального и обоснованного проектирования инженерных сооружений, которые обеспечили бы в дальнейшем устойчивость этих сооружений и бесперебойную их эксплоатацию, возможно лишь при условии, что эти исследования методически будут поставлены правильно, а также и полученный материал будет в дальнейшем правильно оценен и интерпретирован.

К сожалению, вследствие малой изученности вопросов мерзлотоведения, хотя в настоящий момент и имеют место большие успехи и достижения в этом отношении, нельзя сказать, что мы имеем в интересующем нас направлении вполне установившуюся методику. Так, если в настоящее время мы имеем более или менее оформившуюся, проверенную на практике, методику мерзлотных исследований в транспортных целях, частично проработанную методику для поисков источников

водоснабжения и проведения исследований на строительных площадках, предназначенных для возведения на них гражданских и промышленных сооружений, то у нас совсем нет методики исследования вечной мерзлоты в связи с гидротехническим и шахтным строительством. Наряду с этим необходимо оговорить, что и излагаемая нами методика исследований вечной мерзлоты в целях проектирования и возведения инженерных сооружений разработана в процессе проведения исследовательских работ в южных районах области вечной мерзлоты. Безусловно, при проведении таких же исследований в условиях Крайнего Севера предлагаемая нами методика подлежит в некоторых ее частях дальнейшему дополнению и необходимым коррективам в связи с особенностями природы Севера.

В настоящей статье мы не будет останавливаться на тех объектах и приемах исследований, хорошо известных в инженерной геологии, которые должны предшествовать или сопутствовать чисто мерзлотным исследованиям, а остановимся только на этих последних.

Мерзлотные исследования в инженерных целях можно подразделить на два вида: общие научно-теоретические исследования и исследования вечной мерзлоты со специальными целями, преследующие какую-либо одну определенную задачу.

На общих научно-теоретических исследованиях вечной мерзлоты, которые в свою очередь могут быть подразделены на стационарные исследования (мерзлотные станции, опытное строительство и пр.), лабораторно-экспериментальные исследования, теоретические и экспедиционные — по изучению отдельных феноменов вечной мерзлоты, — мы останавливаться не будем, так как это не входит в нашу задачу, а перейдем непосредственно к исследованиям, проводимым со специальными целями. Эти исследования могут быть предварительными (рекогносцировочными) и окончательными (детальными).

Проведением предварительных исследований, связанных как с различного рода мелкомасштабными съемками, так и с облегченными буровыми и горными работами (зондировки, закопушки, неглубокие шурфы и другие виды мелких выработок), должна в основном преследоваться цель — наметить на большой территории подходящие в мерзлотно-геологическом и гидрогеологическом отношениях места под строительные площадки, а в случае проектирования железнодорожных и автогужевых магистралей — наметить направление трассы на местности в пределах широкой (8—15 км) полосы, тяготеющей к будущей дороге.

Основная цель детальных исследований — дать на основании произведенных работ возможно полные материалы о характере вечной мерзлоты, ее проявлениях, а также — об условиях залегания и технических свойствах пород, как оснований под сооружения на местах строительных площадок и вдоль протрассированных железнодорожных и автогужевых линий. В случае неравноценности отдельных мест строительной площадки на основании детальных исследований должны быть выбраны на ней наиболее устойчивые места под ответственные сооружения и определены менее устойчивые для сооружений облегченного типа, или же выбрана другая, более удобная для строительства площадка в другом месте.

Кроме того, при детальных исследованиях собирается материал как для использования в целях строительства отдельных свойств вечной мерзлоты, так и для составления и разработки практических мероприятий по борьбе с вредными ее проявлениями.

Одновременно с этим исследования вечной мерзлоты, как предварительные, так и окончательные, в зависимости от их целеустремленности, подразделяются на исследования:

1) по связи с транспортным строительством;

2) по связи с проектированием гражданских и промышленных сооружений;

3) по связи с проектированием гидротехнических сооружений;

4) по связи с шахтным строительством;

5) по связи с другими видами строительства (аэродромы и посадочные площадки, мелиорационные работы и т. д.).

В связи с тем, что первая стадия исследовательских работ — съемочные работы, независимо от типа инженерных сооружений, во всех случаях проводятся одними и теми же методами и заключаются в изучении одних и тех же объектов, изложение методики мы и начнем со съемочных работ. В дальнейшем, перейдя к разведочным работам, производящимся в интересах различных строительств различно, мы, наряду с общей методикой их производства, рассмотрим отдельные этапы этих работ в зависимости от их назначения.

II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ (РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫЕ) ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные исследования, на что мы уже указывали выше, производятся с целью установления в общих чертах направления мерзлотных процесов и режима вечной мерзлоты в зависимости от геологических, гидрогеологических и почвенно-геоботанических факторов. Этими исследованиями охватываются значительные площади с тем, чтобы в дальнейшем, на основании полученных материалов, наметить для детальных исследований наиболее устойчивые участки, которые могли бы быть зафиксированы, как строительные площадки, обеспечивающие максимум устойчивости инженерных сооружений, запроектированных в том или ином районе. При трассировке железнодорожных и других линий производством этих исследований намечается в широкой полосе наилучшее направление трассы, обеспечивающее в дальнейшем устойчивость земляного полотна.

Выявление мерзлотных процесов при этих исследованиях ведется обычно без буровых работ, а пользуются легкими шурфовочными работами, которые производятся лишь на типичных участках для всей полосы в целом. Шурфование обычно ведется на глубину деятельного слоя; точно так же, если пользуются зондировочными комплектами, то буровые уходят в вечную мерзлоту на небольшую глубину. Часто для определения протаявшего слоя пользуются щупом.

В основном эти исследования должны опираться на съемочные работы, которые нами подробно излагаются в главе об окончательных мерзлотных исследованиях, с той лишь разницей, что мерзлотная съемка при предварительных исследованиях производится с меньшей точностью и детальностью.

Представим себе, что на правом берегу в долине некоторой реки запроектировано сооружение крупного промышленного комбината и намечаются предварительные и окончательные (детальные) мерзлотные исследования. Цель предварительных исследований — наметить в этой долине наиболее удовлетворительные для строительства площадки с апробированием их в дальнейшем детальными исследованиями. Допустим, что долина, в которой предполагается возведение этого комбината,

представлена рядом террас, из которых каждая характеризуется своеобразным мерзлотным режимом.

Первая терраса (древняя пойма) сложена пылеватыми иловатыми суглинками, с поверхности покрытыми торфяно-моховым покровом и представлена торфяно-моховой марью с разреженным и угнетенным древостоем. Вторая терраса, на 25 м превышающая первую, сложена теми же суглинками, но уже представлена моховой марью с древостоем несколько лучшего качества. Третья терраса, сложенная мелкозернистыми аллювиальными песками, характеризуется наличием древостоя высокого качества и поверхностным покровом из лишайников, редких мхов и ягодников. И, наконец, четвертая терраса, граничащая со склоном долины, сложена мощными щебневато-хрящеватыми сильно пылеватыми суглинками и представлена моховой марью, переходящей в марь травяной кочки.

Очевидно, что основной задачей предварительных мерзлотных исследований и является в первом приближении оценка указанных террас со строительной точки зрения. С этой целью, во-первых, производится мерзлотная съемка, которая должна выявить площадное распространение этих террас, их строение, установить наличие явлений, связанных с вечной мерзлотой, их густоту распространения и по внешним признакам интенсивность развития. Кроме того, на каждой из террас изучается поверхностный растительный покров и характер грунта на глубину деятельного слоя, в особенности первых 0,5 м, которые в своей совокупности имеют доминирующее значение и предопределяют баланс тепла.

Все эти элементы исследований наносятся на картографическую основу, имеющуюся в распоряжении мерзлотоведа, методами и способами, указанными ниже.

Горными выработками, закладываемыми хотя бы в нескольких точках на каждой из террас, с одной стороны, определяется характер грунтов, с другой — в них производятся температурные наблюдения и визуальным путем, где это представляется возможным, производится изучение влажностного режима грунтов и режима надмерзлотных вод. Определение глубины протаивания и в некоторых случаях и мощности деятельного слоя производится не только в закладываемых выработках, но и в ряде других точек. Эти определения ведутся металлическими остроконечными щупами.

Из выработок одновременно с их описанием берутся типичные образцы для физико-технических испытаний. В данном случае типичные образцы должны быть взяты с каждой из исследованных террас.

Съемочные работы при предварительных исследованиях производятся в масштабе от 1 : 25 000 до 1 : 200 000. Более мелкий масштаб не пригоден, так как и в масштабе 1 : 100 000 уже весьма трудно отобразить все проявления мерзлотного процесса.

В результате этих исследований составляется мерзлотно-грунтовая карта, которая отличается от мерзлотно-грунтовой карты при детальных исследованиях не только своей схематичностью, но и отсутствием указаний о типе мерзлоты. Тем не менее эта карта должна представлять собой тот материал, на основании которого можно было бы сделать необходимые строительные выводы. Так, например, при исследовании обнаружилось, — что и должно находить себе отражение в такой карте, — что первая терраса сплошь покрыта буграми пучений, в которых выработками вскрыты ледяные линзы. Глубина залегания вечной мерзлоты

колеблется в пределах от 0,55 до 0,95 м. В мерзлом состоянии пылеватые суглинки, которыми сложена эта первая терраса, содержат большое количество ледяного цемента, а в деятельном слое они находятся в сильно переувлажненном состоянии. Не исключена возможность развития на этой террасе наледей. Лабораторные испытания грунтов, взятых с этой террасы, также дали отрицательную характеристику площадке этой террасы.

В том месте, где на карте показана вторая терраса, допустим, что имеем уже меньшую густоту распространения мерзлотных явлений. Глубина залегания верхней поверхности вечной мерзлоты колеблется в пределах от 1,10 до 1,60 м.

В пояснительной записке к карте, которая составляется как обязательное приложение, значится, что грунты менее переувлажнены и их лабораторная оценка более положительна.

Для третьей террасы на всем обследованном ее протяжении зафиксирована одна только наледь. Глубина залегания верхней поверхности вечной мерзлоты находится в пределах от 2,5 до 3,00 м. Лабораторная оценка грунтов вполне положительная.

Представим себе, что для четвертой террасы имеем на карте и в пояснительной записке к ней в высшей степени отрицательную характеристику. Площадка террасы изобилует на карте условными знаками, соответствующими буграм пучений, ледяным линзам, наледным явлениям и оползням. В записке сказано, что несущая способность грунтов в талом состоянии весьма ничтожна, — близка к нулю.

Анализируя только этот материал, т. е. мерзлотно-грунтовую карту и пояснительную записку к ней, само собой напрашивается, что строительная площадка для комбината должна быть приурочена к третьей и только частично ко второй террасам.

А как следствие, и дальнейшие детальные мерзлотные исследования, которые уже с исчерпывающей полнотой должны дать материал для проектирования, с выявлением природного комплекса в целом, также должны быть приурочены к этим террасам.

III. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЕ (ДЕТАЛЬНЫЕ) ИССЛЕДОВАНИЯ

Намеченные предварительными исследованиями наиболее удобные по мерзлотно-геологическим условиям территории для освоения строительством должны быть, как обязательное правило, закреплены детальными исследованиями.

Детальные исследования должны дать, если можно так выразиться, фотографию прочности и устойчивости отдельных типов пород и мерзлотных процессов, в них протекающих. Результаты этих исследований должны служить исходным материалом при проектировании различных сооружений.

Этот вид исследований, которому должны предшествовать или сопутствовать геологическая и гидрогеологическая съемки, на которых мы не останавливаемся, так как они общеизвестны, заключается в проведении: 1) мерзлотной съемки, 2) разведочных работ, 3) геофизических наблюдений и 4) лабораторных испытаний грунтов деятельного слоя и верхней толщи вечной мерзлоты.

В результате производства всех этих работ должны быть установлены:

а) мощность деятельного слоя;

б) строение, условия залегания и генезис грунтов, как оснований под сооружения, а для дорожных насыпей — как материал для их отсыпки;

в) выявление типа вечной мерзлоты и, по возможности, ее мощности;

г) геотермический режим верхней толщи вечной мерзлоты;

д) влажность грунтов деятельного слоя и верхней толщи вечной мерзлоты;

е) режим надмерзлотных вод и направление их потока;

ж) явления, связанные с вечной мерзлотой, их генезис, интенсивность развития и густота распространения;

з) физико-технические свойства грунтов.

VI. ЗНАЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Определение мощности деятельного слоя необходимо, как величины, входящей в формулу по определению глубины заложения фундаментов, почему она и должна быть установлена со всей тщательностью.

Наряду с мощностью деятельного слоя в тех же целях необходимо установление и ряда других факторов.

Так, если существующую формулу Н. А. Цытовича по определению глубины заложения фундаментов представить хотя бы в самом общем виде, то из нее следует, что одним из основных элементов, входящих в формулу, будут силы смерзания.

В общем виде эта формула выражается следующим образом:

$$h_\mu \geqslant \frac{\tau S h - N}{\tau_\mu S};$$

где

h_μ — глубина заложения фундамента в вечной мерзлоте,

τ — силы смерзания грунтов деятельного слоя,

h — мощность деятельного слоя,

S — периметр площади поперечного сечения фундамента,

N — нагрузка на фундамент, включая и собственный вес,

τ_μ — силы смерзания грунтов вечной мерзлоты.

Силы смерзания τ и τ_μ рассматриваются как функция трех переменных: гранулометрического состава грунта, его влажности и температуры, а отсюда следует, что характер и свойства грунтов, их условия залегания и строения являются одним из основных факторов, определяющих силы смерзания. В такой же степени необходимо знание влажности и геотермического режима в верхней толще вечной мерзлоты.

Кроме того, строение и свойства рыхлых отложений необходимы для определения возможных осадок, допускаемых на грунт напряжений при заложении оснований сооружений и для определения трудоемкости земляных работ. Всякого рода деформации грунта также тесно связаны с строением и характером пород деятельного слоя и вечномерзлой толщи. На прочности коренных кристаллических пород мы не останавливаемся, так как эти породы в области вечной мерзлоты для строительства имеют подчиненное значение и, как правило, представляют собой основания, не вызывающие особых опасений.

Знание характера и свойств различных пород необходимо и по тем соображениям, что они входят как определенные величины при определении запасов холода в вечной мерзлоте, при определении теплоемкости и теплопроводности, необходимых при всякого рода теплотехнических расчетах.

Что касается температурных наблюдений, то, помимо указанного их значения для определения глубины заложения фундаментов, при стационарном производстве наблюдений можно точно установить глубину летнего протаивания, а следовательно и глубину залегания верхней границы вечной мерзлоты. Эти же стационарные температурные наблюдения дают возможность определить:

1) амплитуды колебаний температур как в слое летнего оттаивания, так и в верхних слоях вечной мерзлоты;

2) запаздывание температур с глубиной и

3) продолжительность мерзлого состояния грунта на различных глубинах в слое летнего протаивания.

Температурные наблюдения в глубоких скважинах дадут возможность установить глубину залегания нулевой годовой амплитуды и величину геотермической ступени, т. е. тех данных, которые необходимы для определения динамики вечной мерзлоты.

Все эти данные, что частично видно даже из приведенной формулы, необходимы для производства целого ряда инженерных расчетов и сооружений. Так, например, с одной стороны, на основании температурных наблюдений, мы можем судить о глубине заложения водопроводных труб, с другой, базируясь на динамике вечной мерзлоты, определяемой на основании тех же геотермических наблюдений, можно говорить о самом принципе строительства (сохранение или уничтожение вечной мерзлоты), который должен быть положен в основу проектирования инженерных сооружений.

Влажностный режим рыхлых отложений, как деятельного слоя, так и верхней толщи вечной мерзлоты, имеет не менее существенное значение, чем геотермический режим. Так, на основании данных влажности составляются общие соображения о пульсации грунтов. Величины влажности грунтов, определенные перед началом промерзания деятельного слоя, принимаются для установления сил смерзания и пр. Количество ледяного цемента в вечно-мерзлой толще, выраженное в процентах влажности, принимается за основу при определении различных расчетных коэффициентов. Зная влажность вечно-мерзлого грунта, нетрудно определить его осадку под различными сооружениями в случае оттаивания верхней толщи вечной мерзлоты. И, наконец, влажность вечно-мерзлого грунта входит как один из основных элементов для определения запаса холода в толще вечной мерзлоты.

Изучение режима надмерзлотных вод, особенно на местах ответственных сооружений, представляет несомненный интерес в том отношении, что надмерзлотные воды при замерзании вызывают различного рода деформации грунта, отражающиеся на устойчивости сооружений.

Всестороннее изучение мерзлотных явлений, к которым мы относим наледи, бугры пучений, морозные трещины, солифлюкции, явления мерзлотного карста и пр., необходимо по той простой причине, что эти явления представляют наиболее отрицательные формы проявления мерзлотного процесса для строительства.

Нередки случаи, когда, благодаря пучению и развитию наледей в выемках, целые участки железнодорожных линий выбывали из

Рис. 1. Наледное поле на водораздельном плато после полного оттаивания льда в летнее время. Фото С. П. Качурина.

Рис. 2. Человек, провалившийся по пояс в морозную трещину. Фото С. П. Качурина.

эксплоатации на продолжительное время. Незащищенные от наледей автогужевые дороги оказывались совершенно непригодными для проезда, а небольшие жилые дома до потолка заполненными наледным льдом.

Особенно сильно инженерные сооружения деформируются от процессов пучения, происходящих в грунтах деятельного слоя, и обычно связанных с режимом надмерзлотных вод. Самое неприятное влияние процессов пучения на промышленные и гражданские сооружения заключается в том, что эти процессы повторяются ежедневно.

На незначительные деформации первого года, хотя бы в виде волосяных трещин, вызываемых процессами пучения, иногда даже и не обнаруживаемых, накладывается воздействие процессов пучения второго года и так далее до тех пор, пока деформации сооружений не примут угрожающих размеров.

Своевременно установленные площади, подверженные развитию явлений мерзлотного карста, в виде провальных озер и воронок, заблаговременно дадут возможность предусмотреть и не допустить катастрофических деформаций сооружений при постепенных или быстрых просадках оснований, связанных с образованием этих явлений.

Эти — даже и весьма сжатые — данные о значении мерзлотных явлений диктуют необходимость при производстве исследований вечной мерзлоты, в целях проектирования различных сооружений, самого тщательного изучения этих явлений хотя бы в целях разработки технических мероприятий по борьбе с ними. Так, например, при современном состоянии науки о вечной мерзлоте может быть предложено несколько мероприятий по борьбе с наледными явлениями:

1) мерзлотные пояса;

2) тщательное осушение местности, на которой развиваются наледные явления;

3) отвод воды от строительных площадок специальными гидротехническими сооружениями;

4) перепроектирование строительных площадок или перенос трассы с мест, где ожидаются наледи, на места, где их ожидать нельзя;

5) расширение выемок, где ожидаются наледи;

6) защитные валы и некоторые другие мероприятия.

Рекомендовать одно из указанных мероприятий по борьбе с наледными явлениями можно только после того, когда будет установлен генезис явления и интенсивность его проявления. Одно дело, если наледь образовалась за счет выхода, в виде источника, глубинных вод, другое — если она является результатом режима надмерзлотных вод. В первом случае должен быть рекомендован коптаж вод в головке выхода источника и отвод их от сооружения водоотводными канавами, во втором — наиболее рациональными мероприятиями приходится признать мерзлотные пояса и обвалование.

В дополнение к сказанному о мерзлотных явлениях, не затрагивая широко распространенных в области вечной мерзлоты заболоченных пространств вообще, остановимся только на так называемых «марях», широко распространенных в восточной и юго-восточной частях области вечной мерзлоты.

Под марями обычно понимаются слабо покатые пространства с кочковатым микрорельефом, представленные на повышенных элементах рельефа заторфованными с поверхности грунтами, а на пониженных — преимущественно заболоченными, с растительным покровом из вейника, осок, пушицы различных мхов и обычно с угнетенным и разреженным

древесным покровом из ерника и лиственницы. Верхняя поверхность вечной мерзлоты на марях залегает неглубоко — обычно в пределах от 0,30 до 1,0 м от поверхности пониженных элементов микрорельефа.

Рассмотрение этого природного комплекса, объединяемого под общим названием «марь», мы сочли необходимым в настоящей статье потому, что мари в целом требуют своеобразных практических мероприятий при освоении представленных ими территорий строительством, причем практические мероприятия, проводимые на различных типах марей, не являются одинаковыми и значение каждого типа марей для строительства также различно. Так, если возьмем торфяно-моховые

Рис. 3. Разрез бугра пучения на торфяно-моховой мари. На переднем плане отчетливо видна линза льда. Фото С. П. Качурина.

бугристые мари, то им присущи довольно интенсивные процессы пучения, и при понижении верхней границы вечной мерзлоты при строительстве возможны сильные просадки в грунтах деятельного слоя, возникающие за счет оттаивания ледяных линз в буграх.

Мари бугристые, так называемые «могильники», характеризуются чрезвычайно изрезанным микрорельефом и требуют перед освоением их строительством проведения самой тщательной планировки поверхности и дренажа. Мари травяной кочки, с их обычно неблагоприятными в строительном отношении грунтами, характеризуются сильным переувлажнением с поверхности, нередко граничащим с образованием сплошного зеркала воды между кочками.

Не останавливаясь на классификации марей, скажем, что изучение этого природного комплекса должно быть поставлено так, чтобы одновременно с выявлением морфологического строения отдельных типов марей был установлен в каждом отдельном случае их генезис и вредные для строительства их проявления. Только эти данные и правильная их интерпретация дадут возможность разработать практические мероприятия, обеспечивающие устойчивость возводимых на марях сооружений.

Не менее существенное значение, чем все рассмотренные объекты работ, имеет и изучение физико-механических свойств рыхлых пород в талом и мерзлом состоянии. От этих свойств, определяющих несущую способность грунта и его качества, как оснований под сооружения, будут зависеть не только конструктивные особенности нижнего и верхнего строения многих сооружений, но и принципы строительства, которые должны быть положены в основу проектирования сооружений вообще.

Изучение физических и строительных свойств грунтов ведется двумя путями, дополняющими друг друга:

а) испытания грунтов, производимые в полевой обстановке, и

б) испытания грунтов, производимые в лабораториях.

В свою очередь, испытания грунтов, производимые в полевой обстановке, разбиваются на испытания, связанные с изучением физических свойств, и испытания строительных свойств грунтов деятельного слоя и верхней толщи вечной мерзлоты на строительных площадках. На последних, хотя бы методом пробных нагрузок, определяется несущая способность грунтов и другие свойства с тем, чтобы на основании полученных данных определить допускаемое на грунт давление в конкретных естественных условиях.

К полевым испытаниям грунтов относятся:

а) определение объемного веса грунтов естественной структуры при естественой влажности;

б) естественная влажность грунтов на различных глубинах;

в) определение полевыми методами механического состава грунтов;

г) определение полной влагоемкости грунтов при ненарушенной структуре и

д) изучение технических свойств грунтов методом пробной нагрузки:

1) определение временного сопротивления сжатию;

2) определение стабилизованной осадки в результате оттаивания мерзлоты;

3) определение упругих свойств пород верхней толщи вечной мерзлоты.

К испытаниям грунтов, определяемым в лабораториях, относятся:

а) Изучение физических свойств:

1) механический состав — более точно, чем в полевых условиях;

2) истинный удельный вес грунта;

3) полная влагоемкость для уплотненного состояния;

4) пределы по Аттербергу и

5) угол естественного откоса.

б) Изучение коэффициентов, характеризующих зависимость между внешней нагрузкой и состоянием грунта, которыми будут:

1) сопротивление сжатию;

2) коэффициент внутреннего трения;

3) коэффициент фильтрации;

4) зависимость между давлением и влажностью.

в) Испытания, производимые над грунтами в мерзлом состоянии:

1) сопротивление сжатию мерзлого грунта;

2) сопротивление сдвигу;

3) силы смерзания;

4) коэффициент пучения.

Значение знания механического состава грунта[1] огромно не только потому, что механический состав обусловливает в общем физико-механические свойства грунта, о чем мы уже говорили, касаясь сил смерзания, но и потому, что, зная механический состав грунта, мы можем делать заключение о его прочности. Если при проектировании сооружений по принципу сохранения режима вечной мерзлоты механический состав и не играет существенного значения, то зато для грунтов деятельного слоя и при возведении сооружений по принципу уничтожения вечной мерзлоты механический состав грунтов имеет существенное значение. Так, механическим составом грунтов деятельного слоя будут, в известных случаях, определяться силы выпучивания фундаментов. При возведении сооружений по принципу уничтожения мерзлоты механическим составом грунтов вечно-мерзлой толщи будут устанавливаться конструктивные особенности нижнего строения сооружений.

Как видно из опыта, наиболее благоприятными грунтами по механическому составу будут хорошо дренированные галечники и крупнозернистые пески. Возводить инженерные сооружения на этих грунтах по принципу уничтожения вечной мерзлоты, учтя выпучивание фундаментов, можно без всяких дополнительных мероприятий, считая, что на данном месте нет наледных образований.

Глинистые и пылевато-илистые грунты, как основания под сооружения, возводимые по принципу уничтожения вечной мерзлоты, относятся к категории худших грунтов. Помимо отрицательного характера в строительном отношении по механическому составу, эти грунты в области вечной мерзлоты находятся почти всюду в переувлажненном состоянии. Деформации сооружений, возведенных на этих грунтах, могут протекать долгое время и после полного протаивания слоев вечно-мерзлой толщи, находящихся под подошвой фундаментов.

Все это приводит к тому, что глинистые и пылевато-иловатые грунты требуют коренных мероприятий, улучшающих их строительные свойства, вплоть до замены грунта под подошвой фундамента.

Зная механический состав грунта, можно судить и о его качестве не только как основания под сооружения, но и как о материале для отсыпки земляного полотна. И, наконец, последнее, не считая указанную нами ранее зависимость между гранулометрическим составом грунта и его тепловыми свойствами, механический состав при производстве земляных работ является одним из основных критериев трудоемкости последних.

Значение для строительной характеристики объемного веса при ненарушенной структуре, удельного веса грунта и влажности заключается в том, что, зная цифровые характеристики этих физических свойств, можно вычислить ряд коэффициентов, характеризующих грут, как основание под сооружения. Так, зная объемный вес грунта при ненарушенной структуре γ, весовую естественную влажность e и истинный удельный вес грунта Δ, можно определить объемный вес скелета грунта:

$$\delta = \frac{\gamma}{1+e}$$

---

[1] Н. А. Цытович. Основы механики грунтов. ОНТИ, 1934 г. Нижепомещенные формулы взяты из этой работы.

Зная объемный вес скелета грунта, легко вычислить коэффициент пористости Е, имеющей существенное значение для вычисления осадки грунта при действии внешней нагрузки.

Коэффициент пористости определяется:

$$E_1 = \frac{\Delta - \delta}{\delta}$$

Не меньшее значение, чем коэффициент пористости, имеет и коэффициент насыщенности грунта водой. Вычисляется коэффициент насыщенности по формуле, в которую, как отдельные значения, входят естественная влажность, выраженная в долях единицы, и полная влагоемкость грунта, определяемая по формуле:

$$e_n = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\Delta}$$

Нам кажется, что уже этих немногих приведенных доводов вполне достаточно для уяснения значения рассматриваемых физических свойств грунтов для строительной характеристики.

Сопротивление сжатию грунтов в сухом состоянии является характеристикой их дорожных свйств, и довольно часто при характеристике грунтов в этом отношении, зная величины сопротивления сжатию, пользуются предельными значениями разработанного стандарта, по которым и дают оценку. Так, грунты с сопротивлением сжатию > 10 кг/см² и < 20 кг/см² относятся к неудовлетворительным, а грунты с сопротивлением сжатию от 20 до 40 кг/см² — к удовлетворительным в дорожном деле.

Кратко остановимся на значении для характеристики грунтов в строительном отношении коэффициента внутреннего трения и зависимости между давлением и влажностью, в случае возведения сооружений по принципу уничтожения мерзлоты.

По кривой зависимости между давлением и влажностью мы можем определить значение коэффициента сжимаемости a, определяемого по формуле

$$a = \frac{(e_1 - e_2) \cdot \Delta}{p},$$

где

e_1 — влажность грунта, соответствующая его влажности в природных условиях,

e_2 — влажность, соответствующая депрессионной кривой увеличению нагрузки на 0,5 кг/см²,

Δ — удельный вес грунта,

p — нагрузка, равная 0,5 кг/см².

Коэффициент сжимаемости грунта, с одной стороны, имеет самостоятельное значение, как величина характеризующая сжимаемость грунта под воздействием внешних сил, с другой — входит в формулу для расчета предполагаемых осадок, имеющую вид:[1]

$$S = h \frac{a \cdot P}{1 + E_1},$$

где

S — осадка слоя грунта,

---

[1] Н. А. Цытович. Основы механики грунтов. Глава 34. Расчет осадок фундаментов по методу эквивалентного слоя грунта.

h — мощность сжимаемого слоя грунта,
a — коэффициент сжимаемости,
P — давление на см^2,
E_1 — коэффициент пористости, соответствующий условиям естественного залегания.

Кроме того, пользуясь формулой проф. Герсеванова,[1] выведенной им на основе решений теории упругости с учетом внутреннего капиллярного давления в грунте, определяемого по кривой зависимости между давлением и влажностью, и зная коэффициент внутреннего трения, можно определить допускаемую нагрузку на грунт.

Указанная формула проф. Герсеванова может быть представлена:

$$P = \frac{q}{\frac{z_1 - \operatorname{arc\,tg} z - 1}{\pi}},$$

где

$$z = +\sqrt{\frac{1}{\sin^2 S} - 1}$$

P — допускаемая нагрузка на грунт в кг/см^2,
q — внутренее капиллярное давление в кг/см^2,
S — угол внутреннего трения грунта.

Однако необходимо оговорить, что приведенная формула может служить только для предварительного определения допускаемого напряжения на грунт.

Наряду с этим знание коэффициента внутреннего трения необходимо и для определения давления грунта, в случае талого состояния, на подпорные стенки, а отсюда ясно, какое значение в целом имеет зависимость между давлением и влажностью грунта и коэффициент внутреннего трения.

Изучение технических свойств грунтов в мерзлом состоянии[2] необходимо с двумя целями. Во-первых, зная временное сопротивление грунтов сжатию в мерзлом состоянии, при проектировании сооружений по принципу сохранения вечной мерзлоты можно определить допускаемое на грунт напряжение. Во-вторых, что мы уже указывали выше, — такие свойства, как коэффициент пучения, временное сопротивление грунта сдвигу и силы смерзания необходимы для расчетов глубины заложения фундаментов, для разработки мер борьбы с выпучиванием фундаментов и для конструктивного проектирования самих фундаментов.

Необходимость изучения строительных свойств грунтов в естественных условиях, на строительных площадках, вытекает хотя бы из того, что все лабораторные коэффициенты являются до некоторой степени косвенными характеристиками строительных свойств грунта, а испытания методом пробной нагрузки дают результаты, если не в полной мере отвечающие действительным, то значительно приближающиеся к ним. Кроме того, испытывая грунты в естественных условиях, мы можем действительно установить несущую способность пород верхней толщи

---

[1] Н. М. Герсеванов. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ проф. Терцаги. Труды Моск. института инженеров трансиорта, 1930 г.

[2] Н. А. Цытович. Лекции по расчету фундаментов, возводимых в условиях вечной мерзлоты. Тр. 1 Лен. ин-та сооруж., 1933 г.

вечной мерзлоты после ее оттаивания (определение стабильной осадки и пр.).

Заканчивая этим описание значения отдельных объектов работ при исследовании вечной мерзлоты в целях проектирования различных инженерных сооружений, необходимо указать, что они нами затронуты весьма в общем виде и то только потому, что в дальнейшем, при изложении методов работ, с ними все время приходится сталкиваться. В следующих главах настоящей статьи мы главным образом будем лишь останавливаться на методах производства исследований, не касаясь значения отдельных объектов работ.

V. ДЕТАЛЬНАЯ МЕРЗЛОТНАЯ СЪЕМКА

Как мы уже указывали выше, детальной мерзлотной съемке должна предшествовать предварительная мерзлотная съемка, охватывающая вдоль проектируемых железнодорожных и автогужевых магистралей довольно широкую (до 8—10 км) полосу, а при выборе строительных площадок — территории в несколько десятков квадратных километров.

Детальная мерзлотная съемка, в противоположность мерзлотной съемке при предварительных исследованиях, вследствие своей детальности ограничивается незначительными площадями, но производится в значительно более крупных масштабах.

Масштабы детальной мерзлотной съемки находятся в зависимости от типа и ответственности проектируемых сооружений. При исследовании вечной мерзлоты по окончательно отбитой на местности трассе-съемка производится в полосе в один или два километра ширины в масштабе от 1 : 25 000 до 1 : 5000; при этом обычно картографическим материалом служит план трассы в горизонталях, заснятый изыскательскими партиями. Вследствие того, что полоса трассы снимается изыскателями, как правило, шириной 100—200 м, а мерзлотной съемкой должна быть охвачена более широкая полоса, то мерзлотоведы сами или при помощи топографов должны дополнить имеющийся в их распоряжении картографический материал.

При производстве съемки на строительных площадках, запроектированных под гражданские и промышленные сооружения, желательно картографический материал иметь еще более крупного масштаба. Наиболее желательным планом строительных площадок следует признать план площадки в целом в масштабе 1 : 2000, а отдельных участков, предназначенных под наиболее ответственные сооружения, в масштабе 1 : 500.

План должен быть заснят в горизонталях от 0,25 м до 1,0 м по высоте и быть достаточно подробным.

При исследовании вечной мерзлоты по связи с проектированием гидротехнических сооружений наиболее желательными следует признать масштабы от 1 : 500 до 1 : 5000.

В том случае, если детальной мерзлотной съемке не предшествовали предварительные исследования, нельзя ограничиться исследованием только тех участков, на которых запроектированы те или иные сооружения, а надлежит исследованиями охватить более широкую полосу с тем, чтобы была возможность более точно и правильно осветить режим вечной мерзлоты в районе. В противном случае, когда исследованиями будут охвачены только незначительные площади, возможны не

только грубые ошибки, но и довольно трудно установить направление мерзлотного процесса.

Сущность производимой мерзлотной съемки заключается в установлении основных проявлений режима вечной мерзлоты как в деятельном слое, так и в породах верхней толщи вечной мерзлоты, в зависимости от геологических, гидрогеологических, орографических, геоморфологических и почвенно-геоботанических особенностей исследуемого района. Вследствие этого мерзлотная съемка, на что мы обращали внимание раньше, должна проводиться на основе уже сделанных геологической и гидрогеологической съемок района или сопровождаться ими.

Построена мерзлотная съемка должна быть таким образом, чтобы в дальнейшем, при составлении мерзлотной карты, были отражены в основном следующие особенности:

1. Деятельный слой, характеризующийся:
а) мощностью,
б) постоянством мощности на исследуемой территории,
в) степенью увлажненности,
г) характером грунтов,
д) степенью водонепроницаемости.
2. Особенности микрорельефа, связанные с деятельным слоем:
а) бугры и кочки эрозионно-водного происхождения,
б) бугры пучений,
в) наледные процессы,
г) полигональные почвы (пятна — медальоны),
д) явления солифлюкций,
е) оползни, оплывины и псевдотеррасы.
3. Явления мерзлотного карста:
а) провальные озера,
б) просадочные озера,
в) провальные и просадочные воронки и пр.
4. Рельеф верхней поверхности вечной мерзлоты.
5. Мощность толщи вечной мерзлоты.
6. Тип вечной мерзлоты в вертикальном разрезе.
7. Выявление и оконтуривание различных форм таликов.
8. Наличие и оконтуривание в мерзлой толще ледяных линз, пластов и слоев.
9. Надмерзлотные воды и их режим (эти данные изображаются отдельной картой гидроизогипс надмерзлотных вод).

Мощность деятельного слоя является функцией многих переменных, среди которых, кроме климата, а иногда и микрорельефа, главную роль играют: характер растительного покрова и самых верхних (до 0,5 м) слоев грунта, в своей совокупности определяющих тепловой баланс не только грунтов деятельного слоя, но и верхней толщи вечной мерзлоты, степень увлажненности грунтов и морфология рельефа.

Этими же факторами будет определяться и постоянство мощности деятельного слоя, т. е. распределение отдельных участков, характеризующихся одинаковой мощностью деятельного слоя исследуемой территории в целом. Так, например, если взять, скажем, древнюю пойму долины какой-либо реки, сложенную суглинистыми сильно увлажненными грунтами, с поверхности прикрытыми торфяно-моховым покровом, мощностью в общей сложности 0,5 м, с произрастающим разреженным лиственничным древостоем, то мощность деятельного слоя в юго-восточной части области вечной мерзлоты будет для этого участка по-

рядка 0,5—0,8 м. Мощность деятельного слоя для той же древней поймы, сложенной теми же переувлажненными суглинками, но уже с иным растительным покровом — травостой из злаковых и лиственные: береза, ольха и тополь, — будет порядка 1,5 до 2,5 м. На следующей более высокой террасе той же долины, что нами неоднократно проверялось исследованиями в поле, сложенной хорошо дренированными песчаными грунтами, с поверхностным растительным покровом из ягельников, сухих мхов и древесной растительностью из сосны высокого бонитета, мощность деятельного слоя порядка 2,5—3,5 м. Таким образом, оконтурив приведенные для примера участки по присущим для них признакам и определив мощность деятельного слоя хотя бы в трех точках на каждом участке, мы тем самым и оконтурим участки с одинаковой мощностью деятельного слоя. Мы утверждаем, что на Севере в аналогичных условиях распределение мощности деятельного слоя будет таким же, но в других числовых выражениях.

В поле ни в коей степени нельзя ограничиваться одними только записями, а надлежит вести съемку с изображением (условными знаками) всех отмеченных элементов на картографической основе, что в дальнейшем в значительной степени облегчит обработку материалов и предоставит возможность непосредственно в поле делать выводы практического характера.

Приведенная нами схема мерзлотной съемки и условные обозначения для нее не являются исчерпывающими, так как вопрос о приемах изображения объектов мерзлотной съемки выдвигается нами впервые. Однако предлагаемые нами приемы съемки вполне удовлетворяли нас при производстве работ, можно сказать, в огромных масштабах. При выработке условных обозначений мы стремились главным образом к их упрощению, чтобы лицо, производящее съемку в поле, могло довольно быстро наносить на основу во время маршрута все зафиксированные явления и выделяющиеся в исследуемом районе природные комплексы. Предлагаемые нами условные обозначения, иногда резко отличающиеся от существующих в других дисциплинах, в дальнейшем могут быть переработаны, дополнены и уточнены.

Отмечая на плане или карте во время производства исследований условными знаками встречающиеся мерзлотные явления, названные нами особенностями микрорельефа, и случаи мерзлотного карста, мы тем самым, наряду с оконтуриванием участков с одинаковой мощностью деятельного слоя, оконтуриваем и участки, подверженные тем или иным мерзлотным явлениям.

На приведенной нами схематической полевой карте мерзлотной съемки выделяются в основном два участка — первая и вторая террасы. На первой террасе мы имеем, — что наглядно видно из зарисовки, — весьма неблагоприятный режим мерзлоты. Вся площадка террасы сплошь усеяна буграми пучений; в одном месте вдоль подошвы второй террасы развивается больших размеров наледь, и, — что видно по растительному покрову, — грунты деятельного слоя сильно переувлажнены. На второй террасе мерзлотные явления, характерные для первой террасы, совершенно отсутствуют. Грунты, судя по растительному покрову, представленному более сухолюбивыми растениями, хорошо дренированы. Эти данные (приведенная схема соответствует действительным условиям одного из исследованных нами участков) подтвердились и разведочными работами, которыми в буграх пучений были обнаружены значительные линзы льда.

Рис. 4. Схема полевой мерзлотной съемки:

1—наледь фиксированная. 2—марь травяной кочки. 3—травостой. 4—торфяно-моховая марь. 5—береза. 6—лиственница. 7—ольха. 8—кустарник. 9—мощность деятельного слоя в метрах. 10—горелый лес. 11—бугры пучения. 12—кустарники и кустарниковые мары (белоголов, голубика и др.). 13—брусничник. 14—обнаженные дренированные поверхности с лишайниковым покровом. 15—моховый покров. 16—болото. 17—наледь предполагаемая. 18—ель. 19—сосна. 20—тополь. 21—озера протаивания (провальный). 22—оползень. 23—грядки склонов и бугры эрозионно-пожарного происхождения. 24—древний сухостой. 25—пьяный лес.

Вследствие того, что иногда на карту наносится многочисленное количество значков, литологию исследуемого района, как правило, приходится вписывать словами, так как если наносить штриховкой, что мы пытались делать, то все условные знаки сливаются и съемка не упрощается, а усложняется.

Все другие характерные особенности исследованного района, кроме указанных здесь, должны быть не только описаны, но и сопровождены многочисленными мерзлотно-грунтовыми разрезами, зарисовками, фотографиями и другим иллюстративным материалом.

Мерзлотная съемка, с одной стороны, должна предшествовать разведочным работам, а с другой — непосредственно сама должна быть дополнена материалами и итогами этих работ.

В результате проведения мерзлотной съемки, разведочных работ, полевых и лабораторных испытаний грунтов в строительных целях, составляется мерзлотно-грунтовая карта, мерзлотно-геологические или мерзлотно-грунтовые профиля и технические записки. В технических записках излагаются: 1) режим вечной мерзлоты; 2) процессы, протекающие в деятельном слое и вечно-мерзлой толще; 3) заключение о свойствах талых и мерзлых пород исследованного участка, как оснований под сооружения, и даются указания о характере проведения необходимых технических мероприятий, в зависимости от характера сооружений на исследованной территории.

Об обработке полевых материалов и о приемах их оформления мы скажем несколько слов ниже.

VI. РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ

Изучение всех вышеуказанных объектов (мощность деятельного слоя, мощность вечно-мерзлой толщи, условия залегания пород, их строение и свойства, мощность и распространение ледяных слоев и пр.) связано не только с мерзлотной съемкой, но и с проведением разведочных работ, буровых и горных. Мы не останавливаемся на разведочных работах, проводимых геофизическими методами, которые начинают применяться на практике и при мерзлотных исследованиях, так как, с одной стороны, это заняло бы у нас много времени, а с другой — геофизические методы представляют собой в высшей степени специфическую проблему в изучении мерзлоты, если в теории и в достаточной степени разработанную, то на практике с успехом осуществленную, насколько нам известно, в одном районе и то только при некоторых определенных условиях. Геофизическим методам принадлежит будущее, но пока они находятся в стадии испытаний.

Наибольший эффект при специальных мерзлотных исследованиях дают горные работы. Из горных работ может быть рекомендовано проведение шурфов, как дающих наиболее ясную картину характера деятельного слоя и вечной мерзлоты и представляющих возможность наилучшего изучения всего комплекса свойств этих толщ. К сожалению, проведение горных работ при принятых размерах выработок для шурфов $1 \times 1{,}5$ или 1×2 м в области вечной мерзлоты весьма затруднительно. Шурфовочные работы дают наилучшие результаты в тех породах, которые в деятельном слое характеризуются отсутствием надмерзлотных вод, так как проведение этих работ при наличии вод сопряжено с целым рядом неприятных явлений (несмотря на тщательное крепление — заливание шурфов надмерзлотными водами, оползание и оплывание стенок

шурфов и т. д.). Ко всему этому и проходка в высшей степени затруднительна и даже при проходке пожогом, бутом и другими мерами характеризуется большой медлительностью.

Поэтому при проведении выработок в массовом масштабе, как, например по линии железнодорожной трассы, нужно умело сочетать буровые скважины и шурфовочные работы. Обычно при исследованиях на глубину 6—8—10—20 м пользуются буровыми работами, а шурфы применяют на меньшие глубины.

Однако, несмотря на все трудности шурфовочных работ, на ответственных местах по линии трассы и на строительных площадках необходимо закладывать хотя бы по одному глубокому шурфу. В них мы получим самую точную картину залегания грунтов и можем составить вполне ясное представление о свойствах и характере грунтов толщи вечной мерзлоты; по этим данным шурфов мы прокорректируем и данные буровых скважин.

При проходке наносов и несцементированных или слабых коренных пород с целью увеличения быстроты работ и дешевизны может быть применено, как в обычных условиях, ударно-вращательное бурение, а при проходке коренных (скальных) пород—колонковое бурение. Правда, в мерзлотном отношении, как основания под сооружения, скальные породы представляют меньший интерес и мерзлотный режим в этих породах, как показал опыт, сказывается только на их механической прочности, почему главным остаются ударное и ударно-вращательное бурение. Как показал опыт, при бурении в промороженных рыхлых породах, в особенности богатых ледяным цементом, наибольший эффект дает ударное бурение.

В среднем при бурении на глубину до 15 м проходка в мерзлых грунтах выражается порядком 4—5 м за рабочий день; при бурении на бо́льшую глубину, начиная с 15 м, в зависимости от характера пород, от 0,5 м до 0,10 м в рабочий день.

Несмотря на то, что наиболее эффективным является вращательно-ударное бурение при скважинах достаточного диаметра, довольно часто в области вечной мерзлоты приходится, вследствие невозможности проходки наносов вращательным способом, ограничиваться ударным бурением. Наряду с этим, как показал опыт, в экспедиционных условиях при существующей трудности передвижения приходится прибегать за счет уменьшения диаметра скважин к применению более портативных комплектов.

Наиболее распространенными при железнодорожных и дорожных изысканиях являются 2″ и 3″ буровые комплекты. При производстве работ на строительных площадках под гражданские и промышленные сооружения, под гидротехнические сооружения и другие, им аналогичные, когда радиус передвижения по сравнению с дорожными изысканиями сильно сокращен, — следует применять буровые комплекты значительно бо́льших диаметров.

Ударное и ударно-вращательное бурение, в зависимости от характера пород, может быть механическим или ручным.

При проходке деятельного слоя необходимо всегда, независимо от характера пород, прибегать к обсадке; при бурении же в вечно-мерзлой толще, если мерзлота не слоистого типа, бурение можно производить и не прибегая к применению обсадных труб. Перекрытие деятельного слоя обсадкой должно быть полным; обсадочная труба должна углубляться в мерзлоту не менее чем на полтора метра ниже ее верхней границы.

При таком способе обсадки деятельного слоя можно быть гарантированным, что доступ в скважину для надмерзлотных вод прегражден.

В случае, если в мерзлой толще будут встречены таликовые слои, то они, как обязательное правило, также изолируются со всей тщательностью обсадными трубами. При этом, если слой талика простирается на значительно бо́льшую глубину, чем заданная глубина скважины, ее приходится тампонировать.

Лучшие результаты получаются при тампонаже забоя чередующимися слоями глины с промасленной паклей. Для надежности изоляции в том случае, когда бурение необходимо продолжать на глубину, бо́льшую глубины залегания таликового слоя, тампонирование забоя скважины производится глиной с последующим заглублением в нее обсадных труб. Бурение после такого тампонирования производится с применением меньшего диаметра труб.

Бурение скважин с водой при мерзлотных исследованиях допускается только в том случае, когда в скважинах не предполагается прослеживать количество ледяного цемента и производить геотермические наблюдения.

При производстве бурения необходимо тщательное и внимательное изучение колонки буровой не только по извлекаемым из скважин образцам, но и по трудности проходки при бурении. Как правило, при бурении берутся образцы не только при всякой замеченной перемене породы, но и через интервалы 0,5 м.

Однако, вследствие того, что для изучения технических свойств мерзлых пород требуется большое количество образцов, по возможности надлежит собирать весь вынимаемый из скважин материал. В данных целях может быть рекомендовано взятие образцов, если проходимый пласт породы однороден, не с определенной глубины, а из некоторого протяжения колонки, например, от 0,5 м до 1,0 м, от 1,0 м до 1,5 м и т. д. Взятые образцы подвергаются тщательному изучению и описанию, фиксируется их литологический, механический состав и физические свойства по внешним признакам. При извлечении из буровой образцов породы, если в ней будут обнаружены сохранившиеся при бурении кристаллы льда, последние тщательно при помощи лупы изучаются и описываются. Особенно тщательно и внимательно при бурении надлежит следить за всевозможного рода ледяными включениями. Вообще, наряду с этим, ведется подробное описание буровой с указанием: чем производилось бурение, каким образом брались образцы, и указываются степень трудности проходки и другие замеченные при бурении явления.

Отобранные образцы пород в поле же подвергаются дальнейшей обработке: каждый образец тщательно высушивается, упаковывается, согласно существующих правил, и сопровождается установленной формы этикеткой. На этикетке обязательно указывается цель взятия образца и каким он должен в лаборатории подвергнуться испытаниям.

При шурфовании описание разреза производится обычно установленным способом. Во всех случаях, где это только представится возможным проследить, определяется падение и простирание напластований.

Особенно тщательно в шурфах, стенки которых должны быть зарисованы, а если возможно — то и сфотографированы, изучаются ледяные включения, характер и строение льда.

При взятии образцов надлежит иметь в виду, что из скважин образцы берутся нередко с сильно измененной структурой, а иногда с измененным и механическим составом, а кроме того при 2″, 3″ и даже

4″ скважинах извлекаются образцы в недостаточных количествах для технических испытаний. Из шурфов образцы берутся двух размеров, из которых одни (небольшие образцы) предназначаются для общей характеристики напластований в шурфе, а другие, весом около 10 кг, берутся из типичных пластов и предназначаются для технических испытаний. Образцы для технических испытаний, если порода на всю глубину шурфа более или менее однородна, берутся из середины деятельного слоя, на границе деятельного слоя с вечной мерзлотой, в верхних слоях вечно-мерзлой толщи — на глубине заложения подошвы фундамента и на 2—4 м ниже подошвы фундамента, в зависимости от того, на какую глубину пробит шурф.

Как в скважинах, так и и шурфах, с одновременным описанием их разрезов, производится определение мощности деятельного слоя, а следовательно глубина залегания верхней поверхности вечной мерзлоты. Мощность деятельного слоя, определяемая на момент исследования, представляет собой величину относительную. Данные, более или менее близкие к действительной или к истинной глубине залегания верхней поверхности вечной мерзлоты при экспедиционных условиях работы, могут быть получены лишь поздней осенью. Истинные данные, как известно, могут быть получены для данного места и для данных условий в результате наблюдений за много лет. При таких стационарных наблюдениях берется максимальная величина протаивания из всего ряда наблюдений. Несмотря на то, что получающиеся в экспедиционных условиях глубины залегания верхней поверхности вечной мерзлоты соответствуют только моменту исследования, в них есть и положительная сторона, заключающаяся в массовом производстве наблюдений во многих точках, позволяющих делать ряд сопоставлений и сравнений, благодаря которым из осеннего цикла наблюдений мы и получаем как бы первое приближение к истинной глубине залегания верхней поверхности вечной мерзлоты. К полученным при этом величинам должны быть внесены поправки, берущиеся по той из ближайших метеорологических станций, которая наиболее подходит по мерзлотно-грунтовым условиям к тому месту, для которого определена верхняя граница вечной мерзлоты на момент исследования.

Поправки эти заключаются в том, что если наблюдение производилось, когда летнее протаивание еще не окончилось, то первая поправка делается на полное протаивание для данного года; затем, если найденное протаивание для данного года окажется максимальным из многолетних наблюдений взятой нами станции, то на нем можно и остановиться; если же в ряду многолетних наблюдений на станции имеется максимум, падающий на другой год, то следует этот максимум и взять. Так, например, допустим, что в наблюдаемой нами точке на 20 сентября протаяло 110 см, в то время как на станции 120 см. На станции до конца сезона протаивание дошло до 135 см. Отсюда, как первую поправку, к 110 см прибавляем 15 см и получаем 125 см. Максимальное же протаивание на станции из многолетних наблюдений равно 160 см. Следовательно, вторую поправку мы берем 160—135 = 25 см и прибавляем к 125 см, что составит для интересующего нас пункта 125 + 25 = 150 см, как максимальное протаивание.

Второй способ определения истинной глубины залегания вечной мерзлоты заключается в тщательном изучении морфологического строения разреза, распределения влажности по глубине и распределения минеральных и органических веществ, выносимых почвенными раство-

ЧІТАЛЬНА
Обл. Центр. Бібліотекалӧн
— Сыктывкар —

рами из верхних горизонтов в нижние. Многочисленными исследованиями установлено, — в том числе и нашими на крайнем севере Европейской части Союза, — что скопление различного рода солей, нередко образующихся в почвенном разрезе в виде всевозможных конкреций, затем тонких частиц (<0,005 мм) и наибольший процент влажности приурочены к слою над верхней поверхностью вечной мерзлоты. Таким образом, внимательно рассматривая морфологическое строение разреза или аналитические данные в отношении состава и влажности грунтов на различной глубине, можно с достаточной точностью установить верхнюю поверхность вечной мерзлоты. Для примера рассмотрим данные по Северу, приведенные в статье Гутермана [1] для низовьев Енисея и представленные нами в виде следующей таблицы и кривой (см. рис. 5).

Таблица 1

Распределение влажности в деятельном слое по глубинам

	Глубины в метрах							
	0,25	0,50	0,61	0,62	0,86	1,11	1,36	1,63
Процент влажности на сухую навеску	28,2	15,8	16,8	81,0	93,6	159,6	34,2	27,7

Глубина залегания мерзлоты в шурфе, в котором производилось наблюдение над влажностью на момент исследования, была обнаружена осенью на глубине 0,8 м. Наибольшая же влажность была зафиксирована, что наглядно видно на приведенной кривой рис. 5, на глубине 1,11 м, что дает нам полное основание, принимая во внимание ранее приведенные рассуждения, предполагать, что истинная глубина залегания верхней границы вечной мерзлоты в данном пункте находится на глубине порядка 1,20 м.

В дополнение к этому следует указать, что, помимо приведенных нами методов определения истинной глубины залегания верхней поверхности вечной мерзлоты, существует еще ряд методов, основанных как на косвенных значениях, так и на теплотехнических расчетах.

На изложении всех этих методов мы не останавливаемся, так как они представляют специальный вопрос, рассмотрение которого выходит из объема и содержания нашей статьи.

Расстановка разведочных выработок и их количество определяются как площадью самой застройки, так и типом сооружений, характером залегания и степенью выдержанности пород. При сравнительно спокойном залегании пород и значительной мощности наносов, характеризующихся большим однообразием на значительном протяжении, число выработок может быть значительно уменьшено.

Горные выработки при производстве разведочных работ по связи с проектированием железных и автогужевых дорог закладываются в следующих местах по трассе и в прилегающей к ней полосе:

[1] И. Т. Гутерман. Результаты наблюдений над температурным режимом вечной мерзлоты в низовьях Енисея. Метеорологический вестник, издаваемый Мет. ком. Гос. геогр. об-ва, № 10—12. Ленинград, 1932 г.

1) на склонах различной экспозиции,
2) при смене одного природного комплекса другим,
3) на местах запроектированных выемок,
4) на местах запроектированных насыпей,
5) на крутых косогорах,
6) в заболоченных низинах и на маревых пространствах,
7) в местах фиксирования наледей, провальных озер и воронок, оползней, встретившихся ледяных слоев и т. п.,
8) на переходах через водотоки и местах, запроектированных под станционные площадки и под основания высоких подпорных стенок,
9) в местах заложения резервов и карьеров для добычи строительных материалов.

При однородном строении пород и наносов по трассе и при однообразном ландшафте местности, что может быть установлено на основании данных мерзлотной съемки, горные выработки закладываются по оси трассы через 250—500 м, а иногда и более. На участках трассы, где изыскатель сталкивается с часто чередующимися, весьма неоднородными условиями, расстояние между выработками сокращается до 50 м.

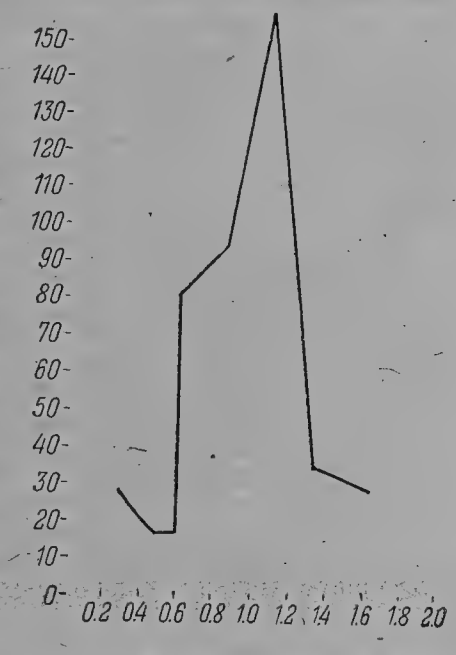


Рис. 5. Кривая распределения влажности в деятельном слое и у верхней границы вечной мерзлоты.

В том случае, если трасса проходит по обнаженным склонам с ясно выраженным их геологическим строением, разведка заключается в заложении небольшого числа мелких шурфов, преследующих установление мощности нарушенного выветриванием верхнего слоя коренной породы. При исследовании станционных площадок разведочные выработки необходимо закладывать не только по оси трассы, но и по поперечным профилям на расстоянии 20—50 м одной выработки от другой.

Но если и вне станции трасса проходит по мерзлотно-грунтовым условиям в неудовлетворительных местах, также необходимо закладывать выработки на поперечниках, с целью выявления наиболее устойчивых грунтов как оснований под железнодорожное полотно. При этом необходимо точно определять от оси трассы расстояние той или иной выработки, заложенной в стороне, привязывая высотные отметки пункта ее заложения к высотным отметкам по трассе.

В этом случае количество разведочных выработок определяется данными мерзлотной съемки.

При обнаружении выработками, закладываемыми по оси трассы, линз и пластов льда производится не только определение их мощности, но и оконтуривание площади их распространения как вдоль оси трассы, так и в стороны от нее. С этой целью скважины закладываются вначале через 100 м от точки обнаружения ледяной линзы, а затем, в слу-

чае ее отсутствия в данной точке, скважины закладываются через 50, 25 и 10 м по направлению к той первой скважине, в которой была обнаружена ледяная линза.

Глубина выработок, закладываемых в связи с проектированием железных дорог, определяется, с одной стороны, мерзлотно-грунтовыми условиями и геологическим строением пункта исследований, а с другой — рабочими отметками профиля, а на станционных площадках — типом сооружений.

В основном глубина выработок по линии трассы при нулевых работах и при невысоких насыпях определяется мощностью деятельного слоя. Контрольные скважины в этих же местах закладываются глубиной на 3-кратную мощность деятельного слоя или до вполне устойчивых пород. При высоких насыпях скважины и шурфы пробиваются на глубину, равную 3-кратной мощности деятельного слоя, или до скального грунта. В выемках скважины и шурфы пробиваются на 1—2 м ниже красных отметок. Глубина выработок на станционных площадках при зданиях облегченного типа определяется 3—4-кратной мощностью деятельного слоя. При возведении сооружений по принципу уничтожения вечной мерзлоты выработки пробиваются на глубину, соответствующую не менее 5-кратной ширине фундамента здания.

При переходах через водотоки, если запроектировано многопролетное искусственное сооружение, скважины бурятся под каждым устоем; под искусственные сооружения малых отверстий скважины бурятся по профилю через долину на расстоянии 25—30 м одна от другой. Глубина выработок в этом случае определяется высотой сооружения и мерзлотно-геологическим строением перехода.

На строительных площадках под гражданские и промышленные сооружения выработки закладываются с двумя целями: с одной стороны, для установления общего характера залегания и строения пород и наносов территории площадки с тем, чтобы в дальнейшем можно было определить наиболее устойчивые места под наиболее ответственные сооружения, с другой — под каждое на территории площадки здание с целью конкретного установления прочности основания под каждым запроектированным сооружением.

В первом случае выработки закладываются на территории площадок по взаимно перпендикулярным линиям на расстоянии около 50—100 м одна от другой. Если выработками будет обнаружена неоднородность в строении и физико-технических свойствах пород, как оснований под сооружения, сеть разведочных выработок должна быть сгущена. При заложении выработок уже с целью конкретного изучения оснований под то или иное сооружение разведочные выработки, как правило, закладываются по углам фундамента запроектированного сооружения и по периметру фундамента, но вне линии фундаментных котлованов.

Глубина выработок определяется ответственностью сооружений. Выработки закладываются на глубину, как уже указывалось выше, ни в коем случае не меньшую 5-кратной ширины запроектированного фундамента.

На характере разведочных работ по связи с проектированием гидротехнических сооружений мы не останавливаемся, так как в этом отношении хорошо учтенного строительного опыта для области вечной мерзлоты у нас не было. В этом направлении можно сделать только некоторые небольшие указания к тем методам разведок, которые существуют

не для области вечной мерзлоты. Так, при производстве исследований вечной мерзлоты по связи с проектированием гидротехнических сооружений, а равно и шахтных должен быть хорошо изучен и выявлен тип вечной мерзлоты на месте запроектированного сооружения, иначе говоря, является ли вечная мерзлота в данном пункте непрерывно по вертикали залегающей или слоистой; представляет ли она собой сплошной массив или массив вечной морзлоты с островами таликов, тип таликов и их генезис и т. д. Кроме того, огромное значение при проектировании гидротехнических сооружений будет иметь гидротермический режим толщи вечной мерзлоты, который должен быть изучен со всей тщательностью.

Выше мы уже указывали, что горные выработки в обязательном порядке закладываются не только по линии запроектированных сооружений, но и на местах развития явлений, связанных с вечной мерзлотой. В данных целях количество закладываемых выработок и их глубина определяются интенсивностью развития самих явлений. Расстановка выработок должна быть организована таким образом, чтобы в результате их проведения была получена полная картина морфологии того или иного явления и был собран достаточный материал для суждения о их генезисе и дальнейшей динамике.

В заключение о производстве разведочных работ укажем, что независимо от типа строительства, как на строительных площадках под гражданские и промышленные сооружения, так и по линии трассы, должны быть заложены, хотя бы в количестве двух, глубокие скважины, глубиной несколько ниже слоя годовой нулевой амплитуды температур. Полученные данные, на что мы уже обращали внимание, дадут материал для суждения о динамике вечной мерзлоты, а следовательно и принципах строительства для данного района в целом.

VII. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Основные геофизические наблюдения, к которым мы относим температурные наблюдения и изучение влажности пород деятельного слоя и толщи вечной мерзлоты, являются неотъемлемой частью всей суммы объектов при исследовании вечной мерзлоты по связи с проектированием различных инженерных сооружений. На значении температурного режима и влажности грунтов мы останавливались достаточно; здесь только укажем, что эти наблюдения производятся одновременно с проведением буровых и горных работ.

Опробование на влажность производится, главным образом, в тех шурфах и скважинах, которые пробиты с целью изучения оснований под гражданские, промышленные и искусственные сооружения (мосты, трубы, крупные выемки, насыпи и пр.) и явлений, связанных с вечной мерзлотой (наледи, бугры пучений, оползни и др.).

Наиболее быстрым и удобным является определение весовой влажности. При этом в шурфах определяется в обязательном порядке весовая объемная влажность. Образцы на влажность и при шурфовании и при бурении, чтобы не пропустить каких-либо сильно переувлажненных прослоек, надлежит отбирать через интервалы не более, чем через 0,5 м по глубине. Кроме того, взятие образцов для опробования на влажность должно производиться и при смене напластований в разрезе шурфа или скважины или при обнаружении выработкой линзы, прослоя и просто включения грунта иного по своим физическим свойствам характера.

При опробовании грунта на влажность методика довольно проста и заключается в следующем: стенка шурфа в горизонте опробования тщательно обчищается, и стальной цилиндр, с одной стороны закрытый втулкой, чтобы получить образец строго определенного объема, вдавливается в очищенную таким образом стенку шурфа и несколько раз в ней поворачивается, затем вынимается вместе с образцом вырезанного грунта, и последний из цилиндра выталкивается в тщательно вымытую, высушенную и предварительно взвешенную бюксу. В дальнейшем определение влажности производится обычным путем. В грунтах гравийных и хрящеватых, когда нельзя взять навеску для определения объемной влажности, берется проба с нарушенной структурой.

Опробование грунтов на влажность при бурении является более кропотливой задачей и не всегда дающей устойчивые результаты. Объясняется это тем, что при бурении, особенно ударном, происходит перемешивание грунта наконечниками бура. Нередко происходит осыпание грунта из верхних слоев на забой, когда вечно-мерзлая толща проходится буровой без осадки, и скопление на забое воды, образующейся при бурении в результате оттаивания ледяных кристаллов и прослойков. Вследствие этого для получения более устойчивых результатов при опробовании грунтов на влажность в скважинах может быть рекомендована такая методика: при проходке скважины, не доводя забой до горизонта опробования на 2—3 см, скважина тщательно очищается. В случае скопления воды на забое последняя удаляется из скважины, и только после этого производится добуривание скважины до горизонта опробования, а уже затем взятие проб на влажность. Количество проб из одного и того же горизонта опробования берется в экспедициях не менее 2, а при стационарных работах — не менее 3. Пробы берутся или в стеклянные стаканчики с притертыми пробками, или алюминиевые бюксы, которые также заранее должны быть вымыты, тщательно высушены и взвешены.

После взятия пробы в стаканчик последний тщательно надлежит закрыть пробкой или крышкой и взвесить обязательно в тот же день по окончании работы. В дальнейшем операция производится общепринятыми методами. После взятия проб и до взвешивания стаканчики нельзя держать на солнце и вообще их следует предохранять от нагревания.

Наряду с опробованием на влажность в шурфах и буровых скважинах производится и изучение термического режима грунтов. Напомним еще раз, что выработки при мерзлотных исследованиях, когда предполагается производить наблюдение над температурным режимом, проходятся без пожогов и воды. Так, например, при проходе скважин даже без подлива воды от прилагаемых усилий на буровой инструмент происходит сильное разогревание стенок, вызывающее значительное нарушение температурного режима. Особенно это резко сказывается при бурении в грунтах, богатых ледяным цементом, где последний при бурении превращается в воду и еще больше способствует нарушению термического режима, почему нередко даже при бурении скважин без воды приходится скважины перед измерением температуры выдерживать значительное время, как принято говорить, дают скважине выстояться. На нижеследующей кривой (рис. 6) нами приведены данные температурных наблюдений в зависимости от продолжительности выстаивания скважины. Бурение производилось без подлива воды, но в иловато-суглинистых грунтах, богатых ледяным цементом. При бурении происходило на-

столько интенсивное оттаивание, что образующуюся в процессе бурения грунтовую жижу приходилось извлекать из скважины желонкой.

Как видно из приведенной кривой, даже при бурении без воды на незначительную глубину (скважина была пробурена всего на пять метров) происходит установление температурного режима после бурения не раньше, чем через пять часов. Как правило, мерзлотовед в начале работ должен поставить аналогичные наблюдения и только после этого вести наблюдения за температурным режимом в массовом масштабе.

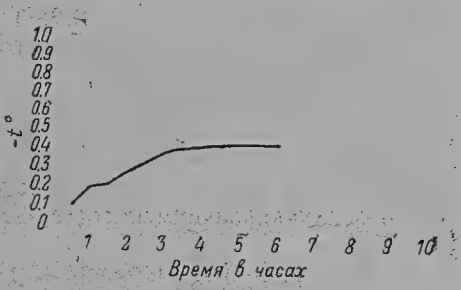


Рис. 6. Температурный режим грунтов в скважине в зависимости от времени ее вытаивания.

При определении температуры в шурфах надлежит стремиться к тому, чтобы при его проходке температура не была изменена посторонними факторами. С этой целью поступают следующим образом.[1] Заранее измеряют длину термометра, которым предполагается измерять температуру грунта в шурфах. Полученную длину (возьмем 40 см) делят на 1,41 и частное (29 см), представляющее собой катет равнобедренного прямоугольного треугольника, гипотенузой которого является длина взятого термометра, принимается во внимание при проходке шурфа и измерении в нем температуры. Дальше поступают таким образом: допустим, что шурф пробивается на ровном горизонтальном месте, вначале его пробивают на глубину всего 21 см и в углу между дном и стенкой, обращенной на север, посредине плотничьим буром бурят скважину под углом в 45° к стенке и к дну (см. рис. 7).

Глубина скважины должна точно соответствовать длине термометра, т. е. в приведенном для примера случае 40 см. При этом шарик термометра придется от дна разреза на глубине 29 см, а от поверхности почвы на глубине 50 см. Для получения бурки наиболее точно под углом 45° к стенке щурфа и дну разбуривание производят по равнобедренному прямоугольному треугольнику (подробности см. в указанной работе проф. М. И. Сумгина). В грунтах, богатых щебнем или галькой, бурку надлежит разбуривать не плотничьим буром, а пробивать небольшого диаметра, равного диаметру термометра, остроотточенным стальным ломиком. Пробуренная таким способом бурка-скважина минут десять выстаивается и в нее вставляется термометр для измерения температуры. Во избежание примерзания термометра к стенкам бурки можно термометр весь или его шарик обернуть неплотно бумагой, которая если примерзнет, то тем защитит термометр от примерзания к стенкам бурки. Сверху термометр прикрывается кусочками мерзлого грунта, если измерение производится в мерзлоте, а вообще талым грунтом со дна шурфа. В бурке термометр выдерживается минут 15—30, в зави-

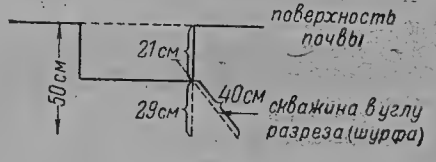


Рис. 7.

[1] М. И. Сумгин. Южная граница вечной мерзлоты в пределах СССР. Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты. Т. II., Л., 1933 г.

симости от сопротивления, оказываемого мерзлотой при разбуривании скважины.

При отсчете температуры по термометру желательно полностью термометр не вынимать из скважины, а отмечать температуру, вынимая его постепенно. При данных измерениях температуры также соблюдается общеизвестное правило — вначале определяются десятые доли градусов, а затем уже целые градусы.

При измерении температуры на последующих глубинах поступают аналогичным способом. Так, если определение нужно сделать на глубине 1 м от повехности грунта, шурф пробивается до глубины 0,71 м; если определение нужно сделать на глубине 1,5 м, шурфу пробивается до 1,21 м и т. д.

Для предотвращения попадания в скважину с установленным в ней термометром воды, стекающей по стенкам шурфа, кругом того места, где установлен термометр, на дне шурфа делается небольшой желобок. Также и на стенке шурфа над термометром устраивается желобок, чтобы вода, стекающая по стенке, не попадала в скважину, где помещен термометр.

Определение температуры в шурфах может производиться обычными психометрическими термометрами; определение температуры в скважинах, уже начиная с глубины 1,0—1,5 м, необходимо производить заленивленными термометрами.

Температурные наблюдения в скважинах в основном производятся на глубинах, соответствующих горизонтам опробования на влажность, т. е. в интервале через 0,5 м.

Наиболее же рациональным при определении температуры в скважинах, в силу вышеуказанных причин, может быть признан следующий метод, оказавшийся в нашей практике наиболее эффективным: бурение скважины производится без перерывов целый день на возможную или необходимую глубину, с одновременным опробованием характера грунта, взятием проб на влажность и описанием разреза буровой. Затем, после окончания работ, скважина около одного часа выстаивается, и только после этого в нее на различные глубины на целую ночь опускаются термометры, подвешенные или на тонком тросе, или на тонком канатике.

Термометры подвешиваются к канатику таким образом, чтобы при опускании их в скважину в виде целой связки шарик каждого термометра точно приходился на уровне глубины замера. Термометры необходимо стараться опускать в скважину совершенно сухими и хотя бы слегка охлажденными.

Предварительное часовое выстаивание скважины и предварительная подготовка термометров производится во избежание примерзания термометров к стенкам скважин.

Помимо этого, необходимо следить за тем, чтобы самый нижний термометр не соприкасался с забоем, а расстояние между ними было не менее 10—15 см.

После погружения всех термометров в скважину конец троса или канатика закручивается кругом патрубка (при обсадке скважины желательно на поверхности оставлять один только патрубок) или торчащего конца обсадной трубы; открытый конец обсадки затыкается пробкой из нетеплопроводного материала, покрывается сверху куском коры или куском древесины, чтобы предохранить возможный доступ в скважину осадков, и скважина со всех сторон обкладывается мхом или торфом.

По истечении ночи скважина раскрывается, термометры постепенно из нее вынимаются, и по ним производится температурный отсчет.

При производстве отсчета, аналогично тому, как это делается и в шурфах, наблюдатель не должен целиком вынимать термометр из скважины.

Производить отсчет, чтобы избежать возможного нагревания термометра, надлежит нагнувшись к самой скважине и по возможности быстро.

В скважинах, закладываемых не со специальными мерзлотными целями, а с промышленными, когда бурение ведется с водой и даже солью, температурные наблюдения производить в процессе бурения нельзя, так как полученные данные будут далеки от истины. Температурные наблюдения в таких скважинах надлежит производить только после того, когда скважина будет пройдена до конца. Пробуренная скважина перед ее ликвидацией или эксплоатацией тщательно изолируется от доступа воздуха, также выстаивается, и только затем производятся температурные наблюдения. Порядок производства температурных наблюдений остается прежним.

Скважина подвергается выстаиванию не менее 3 недель, по истечении которых производятся измерения, затем скважина изолируется вторично, и через неделю производятся контрольные измерения. Если первые измерения совпадают с контрольными, то дальнейшие измерения могут быть прекращены; если же они не совпадают, то через недельные промежутки измерения повторяются, и так до полного совпадения результатов наблюдений.

Рассматриваемые нами методы температурных наблюдений в шурфах и скважинах относятся к термометрическому методу, наряду с которым в последнее время начал завоевывать себе права гражданства метод электрометрический. Этот метод, осуществляемый при помощи термометров сопротивлений, по сравнению с термометрическим, более удобен и точен. Сущность температурных наблюдний термометрами сопротивлений состоит в том, что электропроводность тел зависит от температуры. Если мы некоторый проводник будем помещать в среду с различной температурой, то изменение температуры будет отражаться на электропроводности проводника, изменяя ее. Эти изменения мы можем легко измерить, а по изменениям проводимости знать и изменения температуры той среды, в которую электрический термометр был помещен.

Самый термометр имеет вид небольшой гильзы, в которую помещен приемник температуры — обыкновенно тонкая проволока из платины или другого металла. От приемника идут необходимой длины провода к гальванометру, по которому и делаются отсчеты, приводя их обычно к нулю с помощью реохорда.

Инерция термометров сопротивления небольшая — около 3 минут, следовательно, время измерения температуры на заданной глубине самое большее 10 минут — это на глубине 60—100 м, а на меньших глубинах— еще меньше. Если, например, нужно измерить температуру в скважине глубиной 60 м через пять метров по глубине, следовательно в 12 точках, то на это потребуется не более часа, так как, измерив температуру на глубине 5 м, мы, не вынимая термометра, опускаем его до 10 м, держим три минуты, записываем отметку температуры, опускаем его на 15 м и т. д.

Для сматывания и наматывания проводов нужно устроить простейший ворот. Кроме того, вследствие малого веса гильзы, провода могут

висеть в скважине в виде спиральной линии, поэтому к проводам полезно привязывать некоторый груз, чтобы они висели прямо, но груз этот не должен быть особенно велик.

Однако электрические термометры в экспедиционных условиях имеют и свои недостатки: при передвижении от сотрясений гальванометр может попортиться, и измерений производить будет нельзя. Поэтому с электрическим термометром необходимо самое осторожное обращение.

VIII. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД

Мы не касаемся здесь межмерзлотных и подмерзлотных вод потому, что они достаточно детально рассматриваются Н. И. Толстихиным.

Надмерзлотные же воды, залегающие на вечной мерзлоте, как на водоупорном основании, питающиеся по преимуществу за счет атмосферных осадков, затем за счет поверхностных вод, конденсации паров воздуха на холодной верхней поверхности вечной мерзлоты и, наконец, за счет подтекающих с глубин межмерзлотных и надмерзлотных вод, имеют для строительства огромное значение, как в высшей степени отрицательный фактор, почему нами особо и выделяются.

Особенное значение для строительства имеет переход надмерзлотных вод из жидкой фазы в твердую и обратно, так как с этими процессами связаны наледные явления и вообще пучения грунтов, столь вредоносные для всякого рода сооружений.

При производстве исследований вечной мерзлоты в тех местах, где будут встречены надмерзлотные воды, в первую очередь надлежит установить их генезис. Если они питаются атмосферными осадками, то возможно, что к зимнему сезону, с которым по времени должно быть увязано изучение грунтов, надмерзлотные воды могут оказаться или в минимуме, что наиболее благоприятно для строительства, или, наоборот, в максимуме, что создает опасность сильных пучений. Для выяснения этого вопроса необходимо хотя бы в общих чертах выяснить площадь, с которой к данному месту подтекают надмерзлотные воды. Если, например, исследования производятся по связи с проектированием железных дорог и запроектированная трасса проходит по склону, то в этом месте следует изучение надмерзлотных вод поставить так, чтобы в дальнейшем, хотя бы в общих чертах, можно было бы предусмотреть количество надмерзлотных вод у трассы к зимнему сезону. Для этого особенное внимание необходимо обратить на то, нет ли на вершине возвышенности каменных россыпей, которые являются коллекторами атмосферных осадков, в дальнейшем питающими склоны собранными в них водами атмосферных осадков.

Если надмерзлотные воды в данном месте питаются выходами межмерзлотных и подмерзлотных вод, то следует определить эти выходы, так как при этом условии у нас будут в руках все данные для борьбы с вредным влиянием надмерзлотных вод на сооружения.

Более детально надмерзлотные воды должны быть исследованы на строительных площадках, где будут возводиться ответственные инженерные сооружения, а также в местах выемок.

Если на строительных площадках будет заснята верхняя поверхность вечной мерзлоты, то по ее изобатам можно определить главнейшие потоки надмерзлотных вод, и уже на основании этого можно будет или выключить отдельные места строительной площадки с мощным

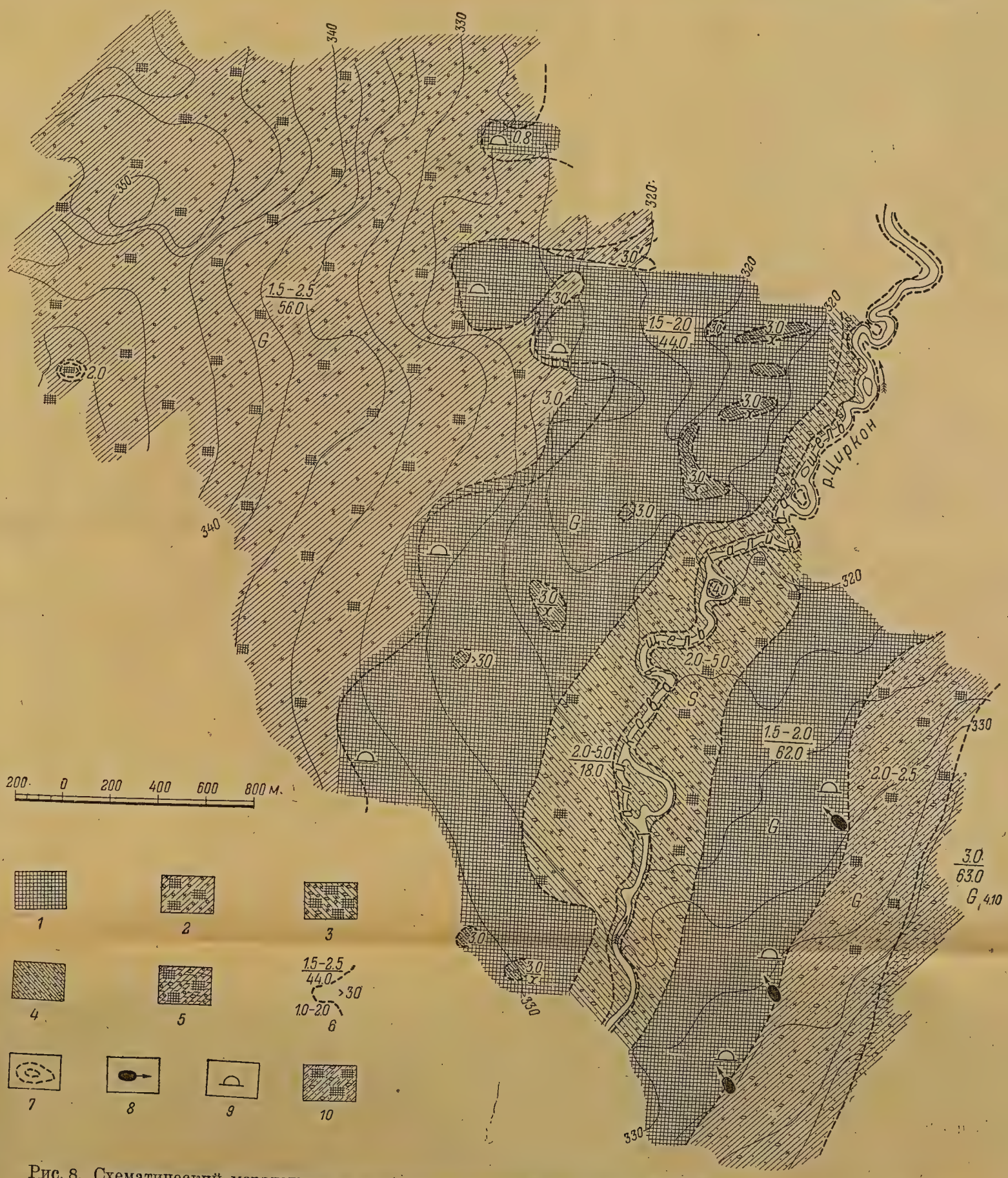


Рис. 8. Схематический мерзлотно-грунтовый план строительной площадки бумажно-целлюлозного комбината I:

1 — преобладание торфяно-мохового покрова мощностью свыше 0,6 м. 2—пылеватые, тяжелые суглинки с гравием и торфяно-моховой покрова между буграми. 3—пылеватые тяжелые супеси с гравием и галькой, прикрытые торфяно-моховым покровом. 4—легкие супеси с гравием и галькой. 5—осуглиненные гравелистые пески с галькой. 6—граница мест с различной глубиной залегания вечно-мерзлого грунта (цифры в числителе указывают преобладающие пределы мощности деятельного слоя, в знаменателе — мощность вечно-мерзлого грунта. 7—озера протаивания (провальные). 8—наледи. 9—бугры пучения. 10— пылеватые легкие суглинки с галькой, прикрытые торфяно-моховым-покровом.

потоком надмерзлотных вод, или перехватить эти потоки канавами или мерзлотными поясами, смотря по тому, что будет рациональнее.

Следует иметь в виду, что прекрасно разработал В. Г. Петров, что в целом ряде случаев сами инженерные сооружения вызывают наледные явления там, где их без этих сооружений не было бы.

Таким образом, надмерзлотные воды должны быть объектом самых тщательных и всесторонних исследований в строительных целях. Поэтому, наряду с указанным, на строительных площадках должны быть со всей тщательностью произведены в отдельных местах замеры глубины залегания надмерзлотных вод, определены их скорость движения и дебит. Для изучения этих свойств надмерзлотных вод могут быть использованы методы и способы, хорошо известные в гидрологии.

IX. ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ

В полевой обстановке, что мы уже указывали, могут быть испытаны, с одной стороны, простейшими способами некоторые физические свойства, с другой — строительные.

Физические свойства (определение объемного веса с ненарушенной структурой, влажности и механического состава) определяются при исследованиях по связи с проектированием всех без исключения инженерных сооружений.

Строительные же свойства при экспедиционных исследованиях, связанных с обследованием значительных по протяженности площадей, как, например, при железнодорожных изысканиях, когда элемент пространства доминирует над элементом времени, изучаться не могут. Изучение этих свойств следует производить только на строительных площадках.

Для изучения в поле указанных физических свойств грунтов исследовательская партия должна быть снабжена небольшой полевой лабораторией, состоящей из сушильного шкафа с нагревательным прибором (лабораторные бензиновые горелки, примус, керосинка и пр.), достаточного количества алюминиевых бюкс, набора сит (10, 4, 2, 1, 0,5, 0,25 мм), 10—15 штук мензурок на 100 см³ для определения в грунте пылевато-иловатых фракций, одного или двух стальных цилиндров для взятия проб грунта определенного объема с ненарушенной структурой, технических весов, двух лабораторных термометров и простейших реактивов.

Определение влажности в поле производится вышеуказанным способом. Наиболее же распространенным и простым методом определения механического состава может служить метод Рутковского-Охотина. Этот метод заключается в разделении частиц грунта на следующие фракции:

1) $>$ 1 мм;
2) от 1—0,25 мм;
3) от 0,25—0,05 мм;
4) от 0,05—0,005 мм и
5) от 0,005 мм.

Первые две фракции выделяются ситами, вторые две (от 0,25—0,005 мм) отмучиваются, а глинистая фракция ($<$ 0,005 мм) определяется по набуханию. Для лиц, впервые сталкивающихся с механическим анализом грунтов, рекомендуется перед выездом в поле этот метод проработать в лаборатории.

Определение объемного веса мерзлых грунтов производится для двух состояний — при естественной влажности и в сухом состоянии.

В первом случае определение объемного веса производится следующим образом. Из мерзлого грунта при отрицательных температурах стальным цилиндром или при помощи ножевки с последующим измерением объема вырезывается образец, который затем взвешивается. Разделив полученный вес образца на его объем, получим объемный вес грунта ненарушенной структуры при естественной влажности (γ).

Для определения объемного веса того же образца грунта, но в сухом состоянии, необходимо из образца взять несколько проб на влажность (не менее трех) и определить среднюю весовую влажность образца.

Объемный вес в сухом состоянии определяется по формуле:

$$d = \frac{(100 - e)}{100}\gamma,$$

где

γ — объемный вес грунта ненарушенной структуры при естественной влажности,

e — весовая влажность образца в процентах.

Исследования технических (строительных) свойств мерзлых грунтов производятся методом пробной нагрузки.

С этой целью на строительных площадках до намечаемой глубины заложения фундамента в вечной мерзлоте выкалываются шурфы размерами не менее 2×2 м в плане каждой, в которых и производятся испытания.

Приборы, применяющиеся при пробной нагрузке, в основном состоят: из нагрузочной платформы, испытательной площадки и прогибомера для определения осадок. Загрузка площадки производится или кирпичами, или крупным песком, вес которых каждый раз определяется опытным путем. После каждой загрузки измеряется осадка испытательной площадки по прогибомеру. Испытания производятся до полного разрушения грунта под площадкой.

Желательно определение временного сопротивления сжатию вечной мерзлоты производить в зависимости от размеров нагружаемой площадки и температуры мерзлоты вплоть до ее оттаивания. Кроме того, весьма важно выяснить изменение осадки загруженной площадки в зависимости от времени и величину осадки, соответствущей определенной нагрузке.

Произведенные испытания дадут возможность установить несущую способность грунта при сохранении режима вечной мерзлоты и после ее оттаивания, что является весьма существенным при проектировании сооружений по принципу уничтожения вечной мерзлоты.

X. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании данных, полученных на месте работ, и результатов лабораторного испытания физико-технических свойств грунтов, предусмотренных программой исследований, составляется мерзлотно-грунтовая карта или мерзлотно-грунтовый план исследованной территории.

Мерзлотно-грунтовая карта или план, масштаб которых обусловливается детальностью съемки и имеющейся в распоряжении исследователя картографической основой, должны представлять собой исходный материал при оценке обследованной территории со строительной точки

зрения. На таком исходном материале (см. примерный схематический мерзлотно-грунтовый план, рис. 8) необходимо отобразить все те элементы природного комплекса, которые в той или иной мере могут отразиться на устойчивости инженерных сооружений.

При составлении мерзлотно-грунтовой карты полосы местности, тяготеющей к исследованной трассе, и карт или планов для отдельных строительных площадок в первую очередь на картографическую основу наносятся грунты, имеющие доминирующее значение в деятельном слое и в верхней толще вечной мерзлоты.

Механические разности грунтов на планах и картах изображаются штриховкой, а генезис раскраской. После нанесения на основу грунтовых данных на карте выделяются территории с одинаковой мощностью деятельного слоя. Выделенные на основе полевой мерзлотной съемки и разведочных работ территории обводятся границей в виде сплошной линии, и в центре очерченного границей участка дробью показывается мощность деятельного слоя и, где определена, мощность толщи вечной мерзлоты.

Как правило, в числителе ставится мощность деятельного слоя, а в знаменателе — мощность вечной мерзлоты. Если на участке встретятся талики, то они сами собой при выделении участков с различной глубиной залегания верхней границы вечной мерзлоты будут на карте выделены. Обычно на месте развития талика пишется «талик» и нередко указывается его форма.

На строительной площадке бумажно-целлюлозного комбината, схематический мерзлотно-грунтовый план которой приведен в качестве примера, был встречен талик щелевидной формы вдоль протекающей здесь речки. На плане талик нашел себе отображение в виде узкой полоски. Очевидно, что на указанной площадке мы имеем сплошную по территории вечную мерзлоту, в одном только месте прорезанную таликовой щелью.

Одновременно с этим на карте отображается и тип мерзлоты по вертикальному разрезу.

Вечная мерзлота, по глубине сплошная, показывается знаком *G;* вечная мерзлота слоистая, в толще которой встречаются талые прослои и пласты — знаком *S*, и, наконец, такие формы залегания вечной мерзлоты, при которых не происходит смерзания деятельного слоя с верхней поверхностью вечной мерзлоты, в нашей практике находили себе отображение в следующем условном знаке *G* 5,05, где цифрой показывалась глубина залегания вечной мерзлоты. Таким образом, сравнивая приведенные на карте цифры, стоящие в числителе, показывающие мощность деятельного слоя, с цифровым обозначением *G*, определяем мощность талого прослоя над мерзлотой при полном промерзании деятельного слоя.

Попутно с нанесением на карту характера грунтов, мощности деятельного слоя, типа вечной мерзлоты и ее мощности, на последнюю наносятся и все зафиксированные на исследованной территории явления и процессы, связанные с вечной мерзлотой. Условные знаки для этих проявлений вечной мерзлоты приведены непосредственно на прилагаемом плане.

Мерзлотно-грунтовая карта в процессе камеральной обработки дополняется продольными и поперечными мерзлотно-геологическими или мерзлотно-грунтовыми профилями. На таких профилях, помимо элементов геологии и грунтоведения, наносится глубина залегания верхней

поверхности вечной мерзлоты, выделяются талики, встретившиеся ледяные пласты, линзы и прослои, и наносится глубина залегания сплошного зеркала надмерзлотных вод. При ответственных съемках и незначительной площади съемки соотношение вертикального и горизонтального масштабов не должно превышать 1 : 5. К сожалению, такое соотношение масштабов возможно только при составлении профилей для строительных площадок и отдельных наиболее ответственных мест по трассе железнодорожных магистралей. Мерзлотно-геологический профиль в таком масштабе по всей линии трассы, когда последняя тянется на сотни километров, явно немыслим. Все наши попытки разработать профиль для таких громадных протяжений, который не искажал бы геологического строения района и в то же время был бы привязан к трассе и удовлетворял потребностям строительства при проектировании, не дали желательных результатов. Поэтому нам пришлось остановиться на профиле, образец которого приводится (см. рис. 9), с сильно искаженным масштабом, но вполне удовлетворяющим запросы проектировщика. Для проектировщика и строителя, — на что мы уже неоднократно обращали внимание, — в области вечной мерзлоты наибольший интерес представляют рыхлые отложения, их свойства, строение и те ледяные включения, которые в них прослеживаются, почему нам и пришлось, увеличив вертикальный масштаб, итти на неизбежное искажение профиля в целом.

Такой профиль будет уже по существу не мерзлотно-геологическим, а мерзлотно-грунтовым, почему и правильнее его называть «мерзлотно-грунтовый профиль».

Мерзлотно-грунтовая карта и профиля должны дополняться и целым рядом графического материала, характеризующего свойства пород как оснований под сооружения и режим деятельного слоя и вечной мерзлоты.

Такими материалами будут:

1) кривые влажности по глубинам,

2) температурные кривые и

3) диаграммы и графики физико-технических испытаний грунтов.

В результате обработки материалов по изучению режима надмерзлотных вод должна быть составлена карта гидроизогипс надмерзлотных вод, с указанием направления их потока. Эта карта должна быть дополнена графиками скорости движения и дебита этих вод в отдельных пунктах исследованной строительной площадки.

Заключительным этапом мерзлотных исследований должна явиться сводная техническая записка. Техническая записка составляется на основании материалов, обобщающих полевые исследования (карты, профиля и графики и данные полевых исследований грунтов), и на основании результатов лабораторного изучения физико-технических свойств грунтов, образцы которых были собраны во время производства полевых исследований. В содержание такой записки, наряду с общим описанием мерзлотно-грунтовых, геологических и гидрогеологических условий исследуемой территории, необходимо вложить обоснованный и вполне между собой увязанный результат полевых наблюдений и лабораторных исследований, который позволил бы рационально спроектировать различные инженерные конструкции и их технические детали. Так, на основании полевых данных о мощности вечной мерзлоты, мощности деятельного слоя, температурного режима верхней толщи вечной мерзлоты, а при отсутствии стационарных наблюдений — температурного

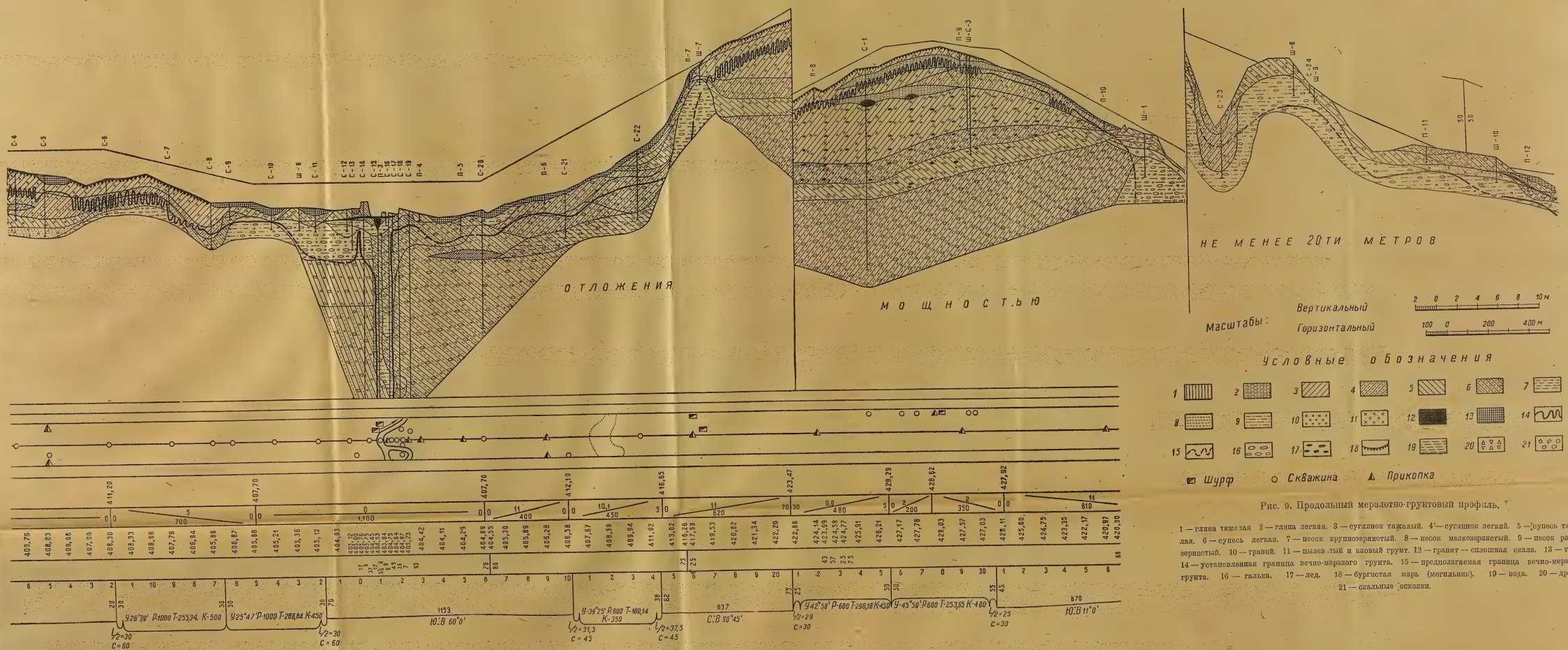


Рис. 9. Продольный мерзлотно-грунтовый профиль.

1 — глина тяжелая 2 — глина легкая. 3 — суглинок тяжелый. 4 — суглинок легкий. 5 — супесь тяжелая. 6 — супесь легкая. 7 — песок крупнозернистый. 8 — песок мелкозернистый. 9 — песок разнозернистый. 10 — гравий. 11 — пылеватый и иловый грунт. 12 — гранит — сплошная скала. 13 — торф. 14 — установленная граница вечно-мерзлого грунта. 15 — предполагаемая граница вечно-мерзлого грунта. 16 — галька. 17 — лед. 18 — бугристая марь (могильник). 19 — вода. 20 — дресва. 21 — скальные осколки.

ЧИТАЛЬНА
Обл. Центр. Бібліотекалён
— Сыктывкар —

Обл. Центр. Библиотекалён
— Сыктывкар —

режима по данным ближайшей к пункту исследований метеорологической станции деятельного слоя, влажности по глубинам и лабораторных испытаний (силы смерзания, силы скалывания, коэффициент пучения и другие) грунтов, — в технической записке даются общие установки о глубине заложения фундаментов и их конструкции. На основании тех же данных предлагаются наиболее рациональные принципы строительства для данного пункта. Даются указания о необходимых дренажных устройствах и других мероприятиях, обеспечивающих устойчивость инженерных сооружений.

XI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что анализ имеющихся данных по Северу, Крайнему Северу и юго-восточной части области вечной мерзлоты дает нам полное основание полагать, что предлагаемые нами методы и указания, хотя и сложившиеся в результате работ в южной части области вечной мерзлоты, могут быть с успехом использованы при исследованиях, проводимых в условиях Севера, в частности Арктики. Правда, мы еще раз подчеркиваем, что наши методы и указания не являются исчерпывающими и во многих случаях рассчитаны на знания, опыт и инициативу самого исследователя.

Мы убеждены, что исчерпывающая методика может быть создана только широким кругом лиц, заинтересованных в учении о вечной мерзлоте. На плодотворность такого коллективного творчества мы и рассчитываем, но в то же время думаем, что настоящая работа положит начало оформления методики мерзлотных исследований.

Н. А. ЦЫТОВИЧ

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ

I. ДЕФОРМАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

Деформации сооружений, возводимых в условиях вечной мерзлоты, являются фактом достаточно известным. От вредного влияния вечной мерзлоты возникают трещины в конструктивных элементах сооружений, выпучивания отдельных частей, неравномерная их осадка. Ежегодно деформируется значительное число зданий и сооружений. Так, по обследованию отдела пути Забайкальской ж. д. (см. 2-й сборник Центр. научно-исследовательского управления НКПС) из 114 зданий оказались деформированными 113, т. е. 99%. Интересно отметить, что наибольшие деформации наблюдались у частей зданий, обращенных на юг (75%) и на восток (25%). По условию залегания грунтов наиболее неблагоприятными оказались глины.

В условиях вечной мерзлоты подавляющее большинство сооружений, возведенных до настоящего времени, имеют нежелательные деформации. Причину появления этих деформаций следует искать в методах возведения и эксплоатации сооружений.

Как правило, еще до настоящего времени сооружения возводятся по старым нормам без учета влияния вечной мерзлоты на сооружения и влияния соружений на вечную мерзлоту.

В то же время уже сейчас есть ряд сооружений, возведенных в условиях вечной мерзлоты и обладающих достаточной прочностью и устойчивостью, т. е. недеформированных. Такие сооружения есть как старинные, так и современные. Нами выдвигается вопрос о необходимости всестороннего изучения сооружений, недеформированных в условиях вечной мерзлоты. Только изучив как условия возникновения недопустимых деформаций сооружений, так и условия, при которых они будут отсутствовать в сооружениях, можно будет окончательно ответить на вопрос о рациональном типе фундаментов сооружений и самих сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Приведем некоторые примеры деформаций сооружений в условиях вечной мерзлоты.

На рис. 1 показана трещина в железобетонной фундаментной рандбалке одного из промышленных сооружений (кожзавода) в условиях вечной мерзлоты. Причина деформаций — пучение грунта деятельного слоя при подтоке надмерзлотных вод.

На рис. 2 приведена фотография деформированной китайской кумирни в Маймачене. Причина деформаций та же, что и в первом при-

мере — пучение деятельного слоя грунта (т. е. слоя ежегодного промерзания и оттаивания).

Рассмотрим причины возникновения недопустимых деформаций сооружений в условиях вечной мерзлоты. Здесь следует учитывать как влияние вечной мерзлоты на сооружения, так и влияние сооружений на режим и свойства вечной мерзлоты.

II. ВЛИЯНИЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА СООРУЖЕНИЯ

Вечная мерзлота существенным образом влияет на сооружения. Это влияние сказывается главным образом в виде выпучиваний отдель-

Рис. 1. Трещина в железобетонной фундаментной рандбалке кожзавода в районе вечной мерзлоты.

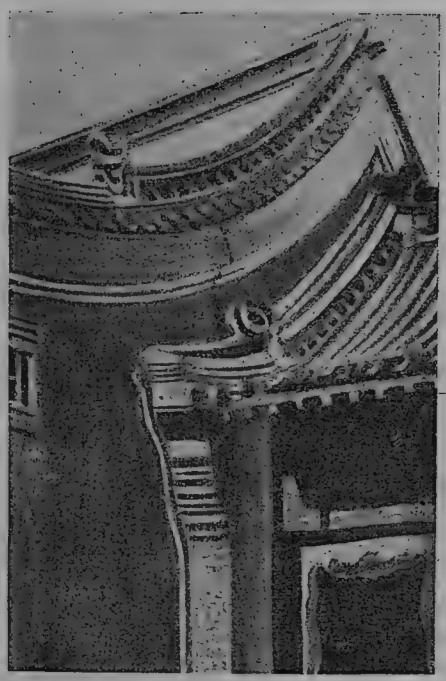


Рис. 2. Деформации здания от пучения мерзлого грунта.

ных частей сооружений. В условиях вечной мерзлоты выпучивание деятельного слоя грунта, вследствие наличия сил смерзания грунта с материалом фундаментов, вызывает значительные растягивающие усилия в фундаментах, часто превосходящие временное сопротивление растяжению материала фундаментов, что вызывает разрушения как фундаментов, так и всего сооружения в целом. Пучение деятельного слоя грунта, вследствие неоднородности слоев грунта как по механическому составу, так и по распределению влажности и температурному режиму (затененность, освещенность солнцем и пр.), происходит неравномерно. Все это создает добавочные усилия в фундаментах и несущих конструкциях сооружений, которые приводят к частичному, а иногда и к полному разрушению сооружения.

Процесс выпучивания может быть иллюстрирован следующими данными.

В Петровско-Забайкальской мерзлотной станции Ленинградского института сооружений производились с 1930 г. по 1933 г. наблюдения за выпучиванием стоек, заглубленных на различную глубину в различные грунты. Регулярно, не менее одного раза в месяц, производилась нивеллировка поверхности грунта и стоек. Наибольшее выпучивание стоек наблюдалось в размере от 25 до 45 см по отношению к поверхности грунта. На рис. 3, по данным А. Ф. Миронова, изображены графики выпучивания поверхности грунта в точках с наибольшими пучинами опытного участка.

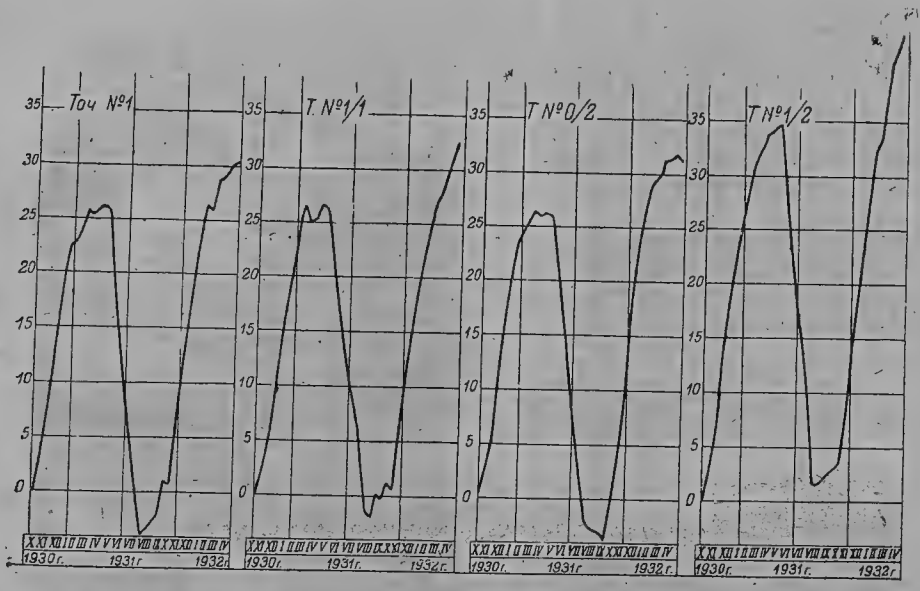


Рис. 3 Кривые выпучивания стоек в условиях вечной мерзлоты (по вертикальной оси отложено выпучивание в см, по горизонтальной — время в месяцах). Грунт — пылеватый суглинок, мощность деятельного слоя 1,40—1,85 м, уровень грунтовых вод 1,0—2 4 м.

Согласно приведенным данным наибольшее выпучивание грунта наблюдается в зимние месяцы. С октября по январь имеет место интенсивный рост выпучивания, далее с января по апрель наблюдается период максимального выпучивания, иногда с местными понижениями, и, начиная с апреля, имеет место период осадки, который продолжается, примерно, до сентября.

Наблюдения показали, что пучение грунта сопровождается приподниманием стоек, погруженных в грунт. При оттаивании поверхность грунта оседает, тогда как стойки почти остаются на прежнем уровне, т. е. остаются выпученными. Отрывка стоек показала, что под стойкой образуется пустота, которая часто заполняется разжиженным грунтом, не дающим возможности осдать стойке вместе с оседанием поверхности. На рис. 4 изображена фотография выпученной стойки (по данным А. Ф. Миронова) в момент раскопки грунта возле стойки (18 апреля 1932 г.).

Выпучивание стойки в данном случае достигало 28—30 см.

Подобные же опыты по выпучиванию стоек производились и на Дальнем Севере (в Усть-Енисейском порту). Так, по данным инж. А. М. Вихмана, трехлетняя нивеллировка деревянных стоек в Усть-Енисейском порту показала, что наименьшее выпучивание имели глубоко заложенные стойки (1,92 м при мощности деятельного слоя 0,7—1 м) и стойки с поперечными перекладинами, находящимися ниже верхней границы вечной мерзлоты.

Вследствие наличия сил смерзания грунта с материалом фундаментов при пучении деятельного слоя в фундаментах возникают значительные растягивающие усилия, противодействовать которым будут: нагрузка на фундамент и сопротивление заделанной в мерзлоте части фундамента.

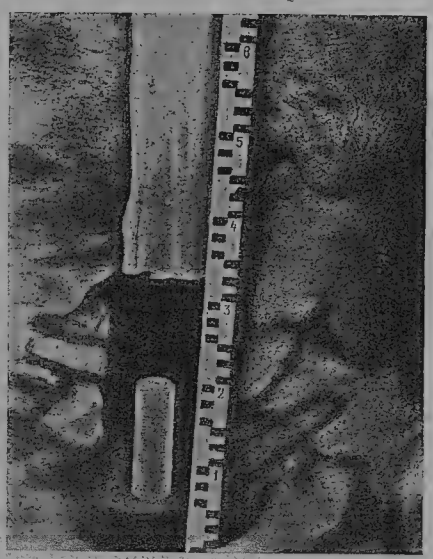


Рис. 4. Отрытая выпученная стойка.

Для того, чтобы предохранить сооружения от выпучиваний, применяется ряд конструктивных мероприятий, обосновываемых соответствующими расчетами, что будет изложено ниже.

Иногда пучины грунта приобретают значительное развитие, возникают местные бугры пучения, достигающие в высоту нескольких метров. Часто бугры дают трещины, из них выливается вода, иногда со значительным напором, и образуются так называемые наледи. Напряжения в наледных буграх могут достигать огромной величины, причем сооружения, находящиеся поблизости от наледи, могут быть совершенно разрушены при взрыве наледных бугров. Так В. Г. Петров, описывая взрыв наледного бугра-кургана на р. Онон Амурско-Якутской магистрали («Наледи на Амурско-Якутской магистрали», изд. Ак. наук, 1930 г.), указывает, что при взрыве были разбросаны в стороны громадные глыбы льда и грунта, причем самая большая глыба была длиною 19 м, шириною до 5 м, толщиною до 2 м. Некоторые глыбы были отнесены потоком хлынувшей из кургана воды на расстояние более 120 м, причем небольшой мост, находившийся возле взорвавшегося кургана, был совершенно разрушен.

Приведенный пример указывает на значительную величину механических воздействий, возникающих в массивах грунта при их промерзании в условиях вечной мерзлоты.

Таким образом, влияние вечной мерзлоты на сооружения может сказываться возникновением совершенно недопустимых деформаций.

III. ВЛИЯНИЕ СООРУЖЕНИЙ НА ВЕЧНУЮ МЕРЗЛОТУ

Возведение сооружений на вечной мерзлоте вносит весьма существенные изменения в режим вечной мерзлоты. Эти изменения сказываются главным образом нарушением температурного режима вечной мерзлоты, что вызывает протаивание вечной мерзлоты под сооруже-

нием, следствием чего появляются осадки фундаментов, часто неравномерные, вызывающие значительные деформации и разрушения всего сооружения. При оттаивании вечная мерзлота из прочной породы с временным сопротивлением сжатию от 20 до 150 кг/см² переходит в разжиженную, часто плывунную массу, неспособную выдерживать нагрузку от сооружения.

Практика строительства в условиях вечной мерзлоты показывает, что части зданий, расположенных на юг, дают по сравнению с другими значительно бо́льшую просадку.

Таким образом, существование самого сооружения, возведенного на вечной мерзлоте, является причиной нарушения свойств вечной мерз-

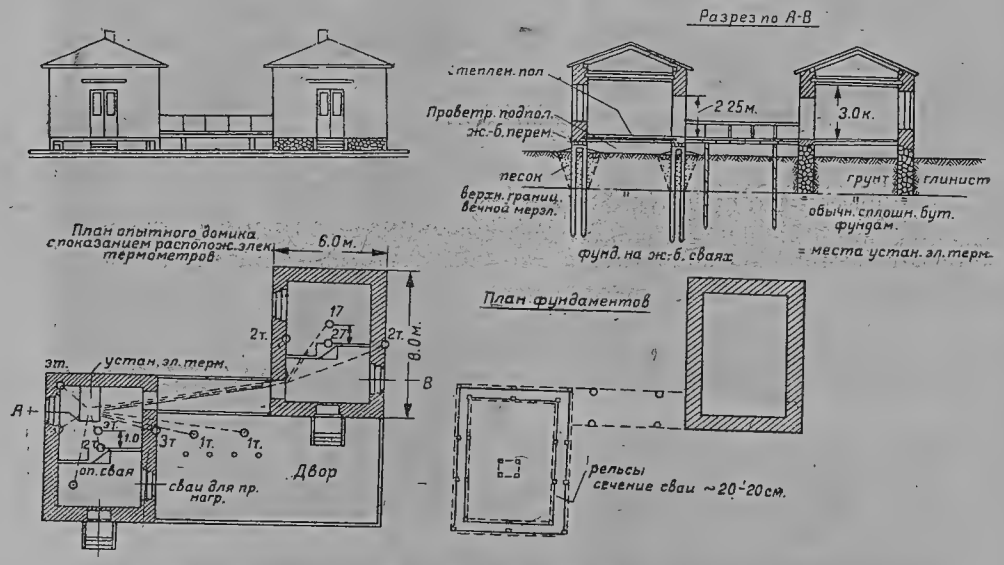


Рис. 5. Проект опытных домов с различной системой фундаментов для условий вечной мерзлоты.

лоты в нежелательном для строительства направлении, т. е. причиной значительного ухудшения свойств вечной мерзлоты (потери ею несущей способности).

Примеров деформаций сооружений, возникших вследствие протаивания вечной мерзлоты под сооружением, можно привести значительное число.

Отметим известный в технической литературе классический пример разрушений от просадок фундаментов Читинских железнодорожных мастерских. Укажем также, что не менее разительным примером разрушений, возникающих вследствие осадок фундаментов при протаивании вечной мерзлоты, является Читинская электростанция, построенная в 1928—1929 гг. в районе Черновских копей. Станция имеет в настоящее время значительные просадки фундаментов, трещины в стенах и несущих конструкциях, что делает ее эксплоатацию небезопасной.

Рассмотрим процесс проникания тепла от здания к вечной мерзлоте. Согласно вышеизложенному этот вопрос имеет не только теоретический, но и весьма существенный практический интерес.

Тепловой процесс во времени может быть охарактеризован соответствующими изотермами грунта и фундаментов.

Для изучения этого процесса весьма существенными данными будут наблюдения за температурой грунта и фундаментов в опытном доме. Такие наблюдения были проведены в течение трех лет в опытном доме Петровской мерзлотной станции Ленинградского института сооружений и обработаны нами.

Вначале предполагалось построить два опытных домика: один — на сплошном бутовом фундаменте, заложенном на уровне верхней границы вечной мерзлоты, по обычным правилам и нормам, и второй — по системе свайных фундаментов с нетеплопроводным полом и с проветриваемым зимой подпольем (рис. 5).

Первый опытный домик был построен в Петровске-Забайкальском, причем в фундаментах и в грунте установлено 22 электрических термометра, по которым до настоящего времени производятся регулярные наблюдения.

Второй опытный домик не был построен Институтом сооружений. Он был в измененном виде, но с сохранением системы фундаментов, осуществлен НКПС на станции Сковородино.

При составлении проекта опытных домиков нами предполагалось, что тепло, теряемое полом здания, нарушит режим вечной мерзлоты под домиком на сплошном бутовом фундаменте, что же касается опытного домика на сваях с проветриваемым подпольем, то под ним, согласно нашим теоретическим расчетам, мерзлота должна была сохраниться.

Практика постройки и эксплоатации опытных домов (Лнтр. инст. сооружений и НКПС) полностью подтвердила наши предположения.

Так, под опытным домом на сплошном бутовом фундаменте, как то будет более подробно показано ниже, действительно температурный режим грунта деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты был сильно нарушен, причем наблюдалось значительное протаивание вечной мерзлоты.

Что же касается опытного дома на сваях с проветриваемым зимой подпольем, то подробных данных о нем мы не имеем. По свидетельству же И. Д. Белокрылова, исследовавшего температуру грунта под фундаментами этого дома, вечная мерзлота не только не протаяла, но наблюдалось значительное повышение ее верхней границы.

Перейдем к рассмотрению некоторых результатов наблюдений температур грунта и фундаментов в опытном доме Института сооружений.

На рис. 6 изображен план и поперечные разрезы опытного домика на сплошном фундаменте, а на рис. 7 фотография домика.

Глубина заложения фундаментов в опытном доме равна 2,8 м. Фундаменты сложены из тщательно притесанной бутовой кладки, причем строителями (инж. Калитина), вопреки первоначальному проекту, был применен ряд мер, уменьшающих влияние вечной мерзлоты на сооружения. Несмотря, однако, на эти меры, мерзлота под домом, как то видно из изотерм фундаментов и грунта, протаяла под фундаментами. Нижеприводимые изотермы грунта и фундаментов построены нами на основании данных измерения температур с помощью электрических термометров сопротивления. Места расположения термометров указаны на рис. 6. Следует отметить, что расположение термометров нельзя признать удачным, так как показания их дают подробную картину температурных изменений лишь на глубине 0,8 м от уровня земли.

Наблюдения были начаты в сентябре 1931 г. и продолжаются до настоящего времени.

Приведем некоторые результаты нашей обработки наблюдений (всего, включая наблюдения по ртутным термометрам, обработано около 30 000 дифр) за температурой грунта и фундаментов в опытном доме.[1]

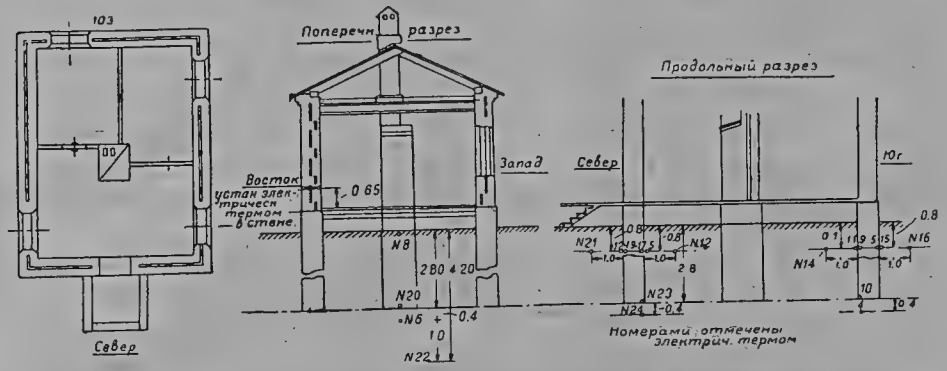


Рис. 6. План и разрезы опытного дома Ленинградского института сооружений, построенного в Петровске-Забайкальском.

Рис. 7. Внешний вид опытного дома.

На рис. 8 изображены изотермы грунта и фундаментов — средние за январь 1933 г. Так как направление теплового потока перпендикулярно к направлениям изотерм, то из рассмотрения рис. 8 можно составить ясную картину о главных направлениях тепловых потоков.

[1] Н. А. Цытович. Исследование температурного режима фундаментов и грунта в опытном доме Петровско-Забайкальской мерзлотной станции Института сооружений. Лингр. институт сооружений.

Изотермы грунта — средние за апрель, июль и октябрь 1933 г. — изображены на рис. 9, 10 и 11.

Из рассмотрения приведенных данных заключаем, что в апреле под опытным домом наблюдалось теплое ядро, в июле имело место относительно равномерное прогревание всей площади застройки с увеличением глубины протаивания у южной стены, что особенно ярко видно из рассмотрения изотерм за октябрь.

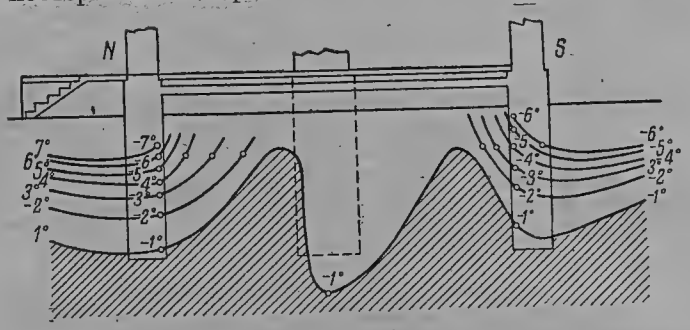


Рис. 8. Изотермы грунта и фундаментов в опытном доме. Средние за январь 1933 г.

Расположение верхней границы мерзлоты в октябре было проверено шурфовкой, причем оказалось весьма близким к изображенному на рис. 11. Таким образом, под опытным домом имеет место неравномерное прогревание мерзлоты, причем подошва фундамента южной стены оказывается расположенной на талом грунте, а подошва фундамента северной — на вечной мерзлоте. Это создает условия, благоприятные для возникновения просадок южной стены, что может вызвать совершенно недопустимые деформации.

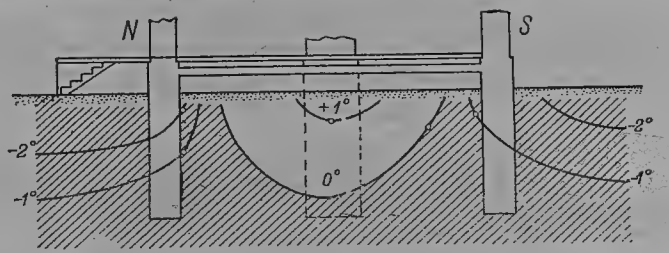


Рис. 9. Изотермы грунта и фундаментов. Средние за апрель 1933 г.

Рассмотренные данные о температурном режиме грунта и фундаментов опытного дома дают возможность сделать следующие выводы:

1. Возведение дома на сплошном бутовом фундаменте в условиях вечной мерзлоты сильно нарушает режим вечной мерзлоты.

2. Нарушение режима мерзлоты под домом и в непосредственной близости от него обусловливает понижение верхней границы вечной мерзлоты у южной стены, что вызывает значительные неравномерные осадки фундаментов, тогда как у северной, наоборот, наблюдается повышение верхней границы мерзлоты.

3. Под всей площадью застройки наблюдается потепление грунта, что особенно ярко вытекает из рассмотрения средних годовых изотерм грунта и фундаментов, изображенных на рис. 12.

4. Расположение стен по отношению к странам света играет первостепенное значение в температурном режиме фундаментов.

Таким образом, возведение отапливаемого здания на вечной мерзлоте, без принятия специальных мер, неизбежно вызывает постепенное неравномерное прогревание мерзлоты под подошвой фундаментов, значительно ухудшающее свойства грунта, как основания для сооружений.

IV. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Вечная мерзлота представляет материал достаточно прочный, хорошо сопротивляющийся механическим воздействиям. Сопротивление мерзлых грунтов внешним силам вообще велико и зависит как от механического состава вечной мерзлоты, так и от ее влажности и величины отрицательной температуры.

Временное сопротивление сжатию мерзлых грунтов колеблется от 20 до 150, а иногда и до 170 кг на квадр. сантиметр.

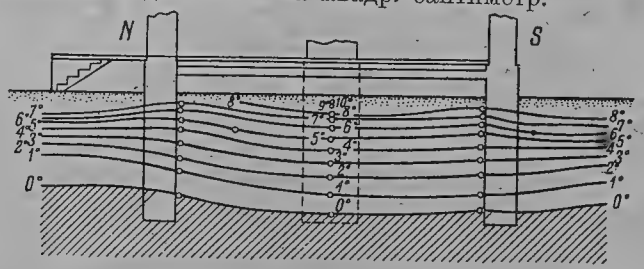


Рис. 10. Изотермы грунта и фундаментов. Средние за июль 1933 г.

Как показали наши лабораторные исследования, сопротивление сжатию насыщенных льдом грунтов (а таких большинство в районах вечной мерзлоты) с увеличением влажности уменьшается. При неполном

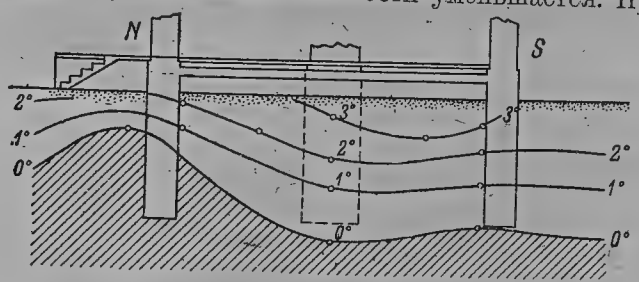


Рис. 11. Изотермы грунта и фундаментов. Средние за октябрь 1933 г.

же насыщении пор грунта водой, что имеет место главным образом в песчаных грунтах, временное сопротивление мерзлого грунта сжатию до определенного предела увеличивается с увеличением влажности. Изложенное может быть иллюстрировано графиком (рис. 13), где по вертикальной оси отложено временное сопротивление мерзлого грунта сжа-

тию в килограммах на кв. сантиметр, а по горизонтальной весовая влажность грунта в процентах.

Новейшие исследования механических свойств мерзлых грунтов, проведенные нами в лаборатории Механики грунтов Ленинградского института инженеров коммунального строительства по заданию Комиссии

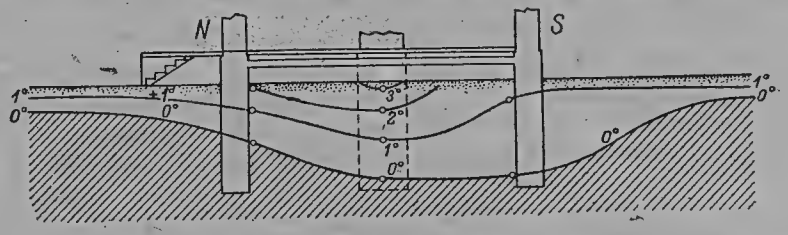


Рис. 12. Средние годовые изотермы грунта и фундаментов в опытном доме за 1933 год. (Область отрицательных температур заштрихована.)

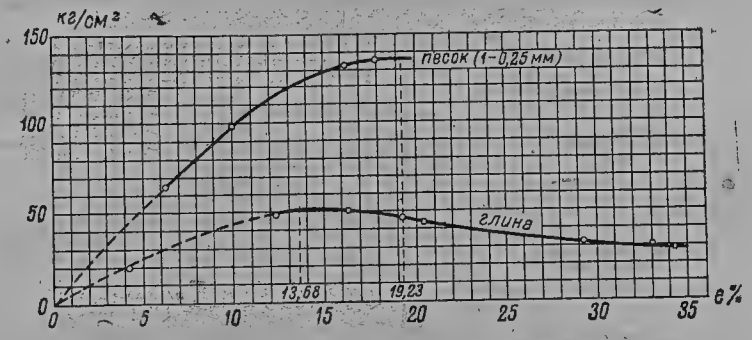


Рис. 13. Зависимость временного сопротивления сжатию мерзлых грунтов от влажности.

по изучению вечной мерзлоты Академии наук, дают основание принять следующие величины допускаемого напряжения на сжатие для вечномерзлых грунтов при сохранении их отрицательной температуры (табл. 1).

Таблица 1

Допускаемые напряжения для вечной мерзлоты (при полном насыщении пор грунта льдом и при сохранении отрицательной температуры вечной мерзлоты) на сжатие в кг на кв. см.

Наименование грунта / Температура мерзлоты С°	Пылевато-илистый — (част. — 0,05—0,005 мм — 63%)	Глинистый (част. диам. менее 0,005 мм — 36%)	Супесчан. и песчаный (частиц от 1—0,05 мм — от 68% до 100 %)
—0,5° до —0,3°	1,5	2	4
—1,5° до —1,0°	3	4	6

Верхний предел допускаемого напряжения на сжатие для вечной мерзлоты при сохранении ее температурного режима мы считаем равным (для песков, насыщенных льдом) 6 кг/см².

Допускаемое напряжение на сжатие для оттаявшей мерзлоты или для мерзлоты, оттаивание которой в дальнейшем предполагается, может быть принято в следующих пределах:

Для пылевато-илистых и глинистых грунтов	0,0—0,5 кг/см²
Для супесчаных и песчаных (в зависимости от плотности)	0,5—1,5 „
Для гравелистых и галечных грунтов	1,5—2,5 „

Для характеристики условий прочности и устойчивости мерзлых грунтов имеет значение не только допускаемое напряжение на сжатие, но и другие виды сопротивлений, как то: силы смерзания, сопротивление сдвигуэ упругие и пластические свойства вечной мерзлоты.

Таблица 2

Значения сил смерзания τ кг/см² грунтов с деревом и бетоном при различной влажности и температуре порядка —0,2 и —1,2°

№№	Смерзающиеся материалы	Весов. влажн. e сила смерз. τ	При $t = -0{,}2$	При средней температуре грунта $t = -1{,}2$			
1	Пыл.-илист. гр. (0,05—0,005 мм—63%)	e% =	29,9	22,4	32,6	43,8	51,2
	с насыщ. вод. дерев.	τ кг/см²	3,6	7,0	8,9	7,1	7,6
2	Глинист. грунт (част. мен. 0,005—36%)	e% =	27,1	22,4	26,4	37,3	56,5
	с насыщ. вод. дерев.	τ кг/см²	2,9	3,2	5,9	13,0	11,8
3	Супесч. грунт (част. 1—0,05 мм—68%)	e% =	12,1	6,7	10,1	13,3	16,5
	с насыщ. вод. дерев.	τ кг/см²	1,3	2,8	4,1	7,2	8,2
4	Суглин. (част. 0,01—0,005 мм—12% менее 0,005 мм—40% .	e% =	—	—	—	—	28,0
	с насыщ. вод. дерев.	τ кг/см²	—	—	—	—	4,1
5	Пылевато-илист. гр. (0,05—0,005 мм—63%)	e% =	—	16,0	33,0	44,0	53,2
	с насыщ. вод. бетон.	τ кг/см²	—	4,4	6,0	9,2	3,1
6	Глинист. грунт (част. мен. 0,005 мм—36%)	e% =	—	17,8	26,3	36,2	43,9
	с насыщ. вод. бетон.	τ кг/см²	—	7,8	4,8	6,4	5,8
7	Супесчан грунт. (част. 1—0,05 мм — 68%)	e% =	—	5,8	11,7	12,1	16,1
	с насыщ. вод. бегон.	τ кг/см²	—	2,8	6,4	7,0	11,1

Силы смерзания. При выпучивании фундаментов в условиях вечной мерзлоты силам, возникающим у боковых его граней, необходимо преодолеть главным образом следующие сопротивления: временное сопротивление срезыванию льда, трение фундамента о мерзлый грунт и нагрузку на фундамент. Суммарную величину первых двух составляющих и называют силой смерзания.

Величина силы смерзания грунтов с деревом и бетоном в зависимости от механического состава грунтов, их влажности и величины отрицательной температуры может колебаться в значительных пределах— от 1,3 до 34 кг/см², т. е. может достигать огромной величины.

Таким силам, как 34 кг/см² = 340 тонн на квадратный метр боковой поверхности фундаментов, никакая конструкция фундаментов противостоять не сможет. Поэтому, с одной стороны, приходится применять ряд мер, уменьшающих силы смерзания грунта с материалом фундаментов, а с другой, — использовать те же силы смерзания, но не деятельного слоя, а слоя вечной мерзлоты, т. е. приходится заглублять фундамент на некоторую величину и рассчитывать на смерзание заделанной части фундамента с мерзлотой. Так как верхние слои вечной мерзлоты

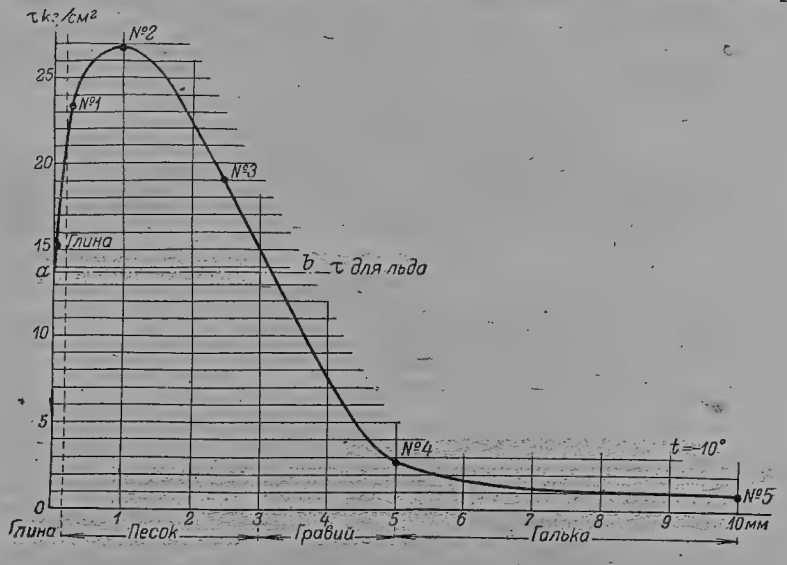


Рис. 14. Зависимость сил смерзания от механического состава грунтов.

имеют незначительную отрицательную температуру, то весьма существенными данными являются силы смерзания грунтов с материалом фундаментов при незначительных отрицательных температурах.

Некоторые значения сил смерзания грунтов с насыщенным водой деревом и бетоном по опытам, произведенным под руководством автора сотр. И. С. Вологдиной, приведены в табл. 3.

Применение приведенных в табл. 2 данных о величине сил смерзания при расчетах закрепления фундаментов в вечной мерзлоте должно производиться лишь с введением некоторого коэффициента безопасности, который следует принимать с учетом возможного уменьшения сил смерзания для более сухих материалов фундамента до 2½ раз.

Одной из самых существенных мер, уменьшающих выпучивание фундаментов, является замена грунта деятельного слоя наименее смерзающимся материалом.

Таким естественным материалом, как то вытекает из результатов наших опытов по определению сил смерзания насыщенных водой грунтов с деревом, является однородная крупная галька. Так, на рис. 14

изображена зависимость сил смерзания при температуре —10° от механического состава грунтов (по вертикальной оси отложены силы смерзания τ кг/см², а по горизонтальной диаметр преобладающего зерна). Эта кривая показывает, что наименьшей силой смерзания (порядка 0,9 кг/см²) обладает галька с диаметром зерен более 10 мм.

Однако такой величиной силы смерзания будет обладать лишь чистая, незаиленная галька. Как показывают наши опыты, результаты которых приведены в табл. 3, заиливание гальки, а тем, более заполнение

Таблица 3

Результаты опытов по определению сил смерзания гальки с деревом

№№ п/п	Смерзающиеся материалы	Условия опыта	Весовая влажн. e%	Темпер. образца C°	Сила смерз. τ кг/см²	Примечание
1	Галька диам. от 20—10 мм с деревом	Чистая галька пролитая водой, стойка насыщена водой	1,4	—9,9	0,9	В таблице приведены средние результаты из нескольких определений
2	Галька диам. от 20—10 мм с деревом, насыщенным водой	Заиленная галька (пролита 3 раза раствором пылевато-илистого грунта)	2,8	—10,5	1,6	Процент ила 1,8% по весу
3	Тоже	Галька, загрязненная глиной путем троекратной проливки глинистым раствором	1,4	—10,1	2,1	Процент глины 1,4% по весу
4	„	Все поры гальки заполнены льдом	27,9	—9,5	27,3	
5	„	Все поры гальки заполнены глиной	24,2	—10,2	31,6	Процент глины 13,7% по весу

ее пор льдом или глиной значительно повышает силы смерзания и делает загрязненную гальку материалом неудовлетворительным для засыпки фундаментов.

Охарактеризуем величину сопротивления сдвигу мерзлых грунтов, которая имеет весьма существенное значение для расчета частей фундаментов, заделанных в вечную мерзлоту.

Если нижняя часть фундамента будет заделана в вечной мерзлоте, то возникает вопрос о прочности слоя вечной мерзлоты и необходимости расчета слоя мерзлоты, находящегося выше подушки фундамента, на скалывание или сдвиг.

Результаты произведенных исследований в руководимой мною лаборатории Ленинградского института сооружений сотрудником М. Л. Шейковым показывают, что влияние механического состава насыщенных водой мерзлых грунтов на величину их временного сопротивления сдвигу незначительно. Влияние же температуры имеет весьма существенное значение.

Величина временного сопротивления сдвигу τ_s мерзлых грунтов в зависимости от температуры может быть выражена с достаточной для практических целей точностью следующим уравнением:

$$\text{врем. } \tau_s = 1{,}4 + 8{,}8\ t \qquad (1).$$

Здесь:

τ_s — временное сопротивление сдвигу мерзлых грунтов в кг на квадратный сантиметр,

t — абсолютное значение отрицательной температуры в градусах Цельсия.

Допускаемое напряжение на сдвиг мерзлых грунтов может быть получено с помощью формулы (1), разделив величину временного сопротивления сдвигу τ_s на коэффициент безопасности (рекомендуемая величина коэффициента безопасности $n = 4$).

Отметим еще, что весьма существенным свойством мерзлых грунтов (например, при расчете фундаментов на динамическую нагрузку) является их упругость.

Согласно произведенным нами испытаниям, мерзлые грунты обладают значительной упругостью. Но, кроме упругой деформации, всегда имеет место пластическая деформация, не погасающая с течением времени.

Для глинистых, пылевато-илистых и супесчаных мерзлых грунтов, имеющих все поры заполненными льдом, пластические деформации при определенных условиях приобретают первостепенное значение даже при незначительных напряжениях (порядка 1,5—2,5 кг/см² при температуре —1°).

Произведенные испытания показывают, что при определенных условиях могут наблюдаться непогасающие с течением времени деформации мерзлых грунтов, что будет являться совершенно недопустимым для возведенных на мерзлоте сооружений.

Изучение условий возникновения пластических деформаций мерзлых грунтов является одной из существенных задач, которую необходимо поставить на разрешение в ближайшее время.

Что касается упругих постоянных мерзлых грунтов, то величина модуля Юнга в зависимости от температуры для различных мерзлых грунтов может быть, согласно нашим испытаниям, выражена линейной зависимостью (табл. 4).

Таблица 4

Значение модуля Юнга мерзлых грунтов

Грунт	Влажн. в % %	Уравнение $E = \alpha + \beta \cdot t$	Примечание
Песок	22	$E = 10^4(0{,}5 + 2{,}18t)$ кг/см²	$t°$ — абсолютное значение отрицательной температуры в градусах Цельсия. По опытам Цытовича и Вологдиной
Супесок	23	$E = 10^4(0{,}6 + 0{,}80t)$ кг/см²	
Пылевато-илистый грунт .	26	$E = 10^4(0{,}5 + 0{,}11t)$ кг/см²	
Глина	29	$E = 10^4(1{,}1 + 0{,}24t)$ кг/см²	
Лед	—	$E = 10^4(5{,}0 + 0{,}10t)$ кг/см²	По данным проф. Krayger'a

Здесь необходимо отметить устанавливаемую приведенной таблицей закономерность, а именно: угловой коэффициент прямой, выражающей зависимость модуля Юнга от температуры, уменьшается с уменьшением скелетной части грунта, а начальный коэффициент прямой увеличивается.

Таким образом, влияние отрицательной температуры на величину модуля Юнга особенно значительно для скелетных грунтов (песок) и становится менее значительным для льда.

Что же касается другой упругой постоянной — коэффициента Пауссона, то величина его для различных мерзлых грунтов и льда колеблется от $\mu = 0{,}20$ до $\mu = 0{,}45$, в зависимости от рода материала и температуры.

V. О ВЫБОРЕ ТИПА ФУНДАМЕНТОВ

Выбор типа фундаментов сооружений, возводимых в условиях вечной мерзлоты, зависит как от свойств вечной мерзлоты, так и от свойств самого сооружения (величины площади застройки, температурного режима внутри помещений и пр.).

Строительные свойства вечной мерзлоты могут быть определены лишь исследованием грунтов на месте постройки. Эти исследования должны заключаться в определении: верхней границы вечной мерзлоты, мощности слоя вечной мерзлоты и в изучении для грунтов слоя летнего протаивания и слоя вечной мерзлоты температуры, влажности, объемного веса и механического состава.

Знание верхней границы вечной мерзлоты, т. е. мощности деятельного слоя, необходимо для определения глубины заложения фундаментов и их расчета на выпучивание. Точное определение верхней границы вечной мерзлоты возможно лишь путем длительных наблюдений температуры грунта на различных глубинах.

Приближенное определение мощности деятельного слоя можно произвести путем открытого шурфования в период времени, соответствующий первым морозам.

Данные о температуре грунтов деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты имеют первостепенное значение и при расчетах устойчивости мерзлоты под сооружением.

Температура грунта на глубинах порядка нескольких метров, а тем более десятков метров может быть получена тщательными измерениями в буровых скважинах с помощью ртутных или электрических термометров.

Знание температуры грунтов, как слоя летнего протаивания, так и слоя вечной мерзлоты, дает возможность в связи с другими данными решить вопрос о деградации вечной мерзлоты в данном районе, что имеет первостепенное значение для выбора типа фундаментов.

Мощность слоя вечной мерзлоты определяется бурением или шурфованием. Если слой вечной мерзлоты пройден на глубину 10—15 м, то во многих случаях можно ограничиться указанной глубиной.

При производстве шурфовых работ (как минимум, для каждого места постройки необходимо вырыть три шурфа) для проб грунта естественной (ненарушенной) структуры определяются естественная влажность и объемный вес.

Кроме того, для образцов нарушенной структуры определяется, хотя бы полевым методом, гранулометрический состав.

Перечисленные данные необходимы для определения по приведенным выше материалам допускаемого давления и расчетных величин сил смерзания и, кроме того, для вычисления баланса тепла, начальной пористости грунта и других величин, входящих в расчеты.

Гранулометрический состав грунтов также является весьма важной характеристикой. Если для данного места постройки преобладают пылевато-илистые или глинистые грунты, то следует опасаться значительного их пучения. При оттаивании эти грунты превращаются в разжиженные массы с ничтожно малой несущей способностью.

Песчаные грунты, особенно гравелистые и галечные, будут более благоприятными как основания для сооружений. Пучинистость этих грунтов при увлажнении и замерзании незначительна и, кроме того, они при оттаивании будут обладать несущей способностью, хотя и пониженной по сравнению с грунтами, находящимися в обычных условиях, но все же такой, что возведение на них сооружений не встречает особых затруднений.

Отметим, что при наличии надмерзлотных вод, т. е. при подтоке воды, и эти грунты будут выпучиваться, что нами неоднократно и наблюдалось в условиях вечной мерзлоты.

При выборе места под сооружение необходимо руководствоваться следующим:

1. Наиболее надежными основаниями в условиях вечной мерзлоты являются коренные породы (скала).

2. Из имеющихся грунтов лучшими являются сухие песчаные и галечные грунты.

3. Наличие значительных толщ ископаемого льда делает данное место совершенно непригодным для возведения сооружений.

4. Надмерзлотные воды и заболоченность местности являются отрицательными характеристиками района.

Кроме свойств грунтов деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты, для выбора типа фундаментов существенное значение имеет температурный режим внутри сооружения и его площади застройки.

Так, при сооружении некоторых металлургических цехов (напр., мартеновского, цеха отражательных печей и др.) исходить из сохранения режима мерзлоты под ними, вследствие значительного выделения тепла этими сооружениями, вряд ли представляется целесообразным.

Неотапливаемые же сооружения или сооружения, отапливаемые до обычной комнатной температуры, будут значительно менее нарушать режим вечной мерзлоты.

В случае, если мощность вечной мерзлоты в данном районе значительна, мерзлота имеет температуру от одного до нескольких градусов ниже нуля, и если сооружение не выделяет большого количества тепла, то можно предполагать сохранение режима мерзлоты и сооружения конструировать, исходя из этого принципа.

Деревянные неотапливаемые помещения, здания жилые и общественные, отапливаемые до обычной температуры, могут возводиться, исходя из условий сохранения режима мерзлоты под сооружением, причем в этом случае глубина заложения фундаментов и их конструкция (устройство проветриваемого подполья и пр.) определяются, исходя из условия постоянства отрицательной температуры их подошвы.

Если в данном районе имеется деградирующая вечная мерзлота, имеющая температуру около $-0{,}1^{\circ}$, или слоистая вечная мерзлота, то сохранить такую мерзлоту под отапливаемыми сооружениями пред-

ставляется затруднительным. Также затруднительным будет сохранение режима мерзлоты под горячими цехами. В этом случае фундаменты конструируют, исходя из принципа постепенного исчезновения мерзлоты под сооружениями, как на слабых талых грунтах, но с учетом пучений грунта и возможных осадок фундаментов. Возведение сооружений по принципу уничтожения мерзлоты на пылевато-илистых и глинистых грунтах, без принятия специальных мер, невозможно, так как неизбежно ведет сооружения к полному разрушению.

VI. ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ РЕЖИМА МЕРЗЛОТЫ

Применение принципа сохранения режима мерзлоты при возведении сооружений на вечной мерзлоте дает возможность использовать лучшие свойства вечной мерзлоты, а именно ее большую сопротивляемость внешним силам. При этом температура слоя вечной мерзлоты, на котором возводятся фундаменты, должна быть во все время существования сооружения отрицательной.

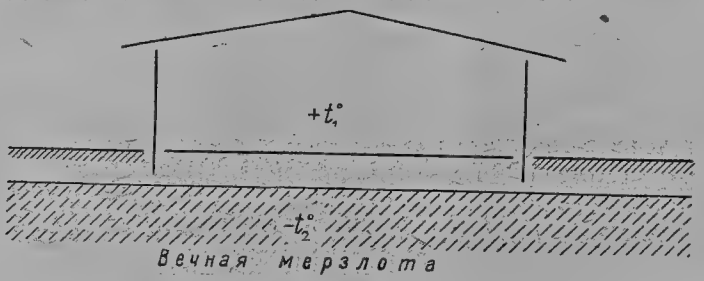


Рис. 15.

Рассмотрим, при каких условиях под сооружениями может быть сохранена отрицательная температура мерзлоты.

Представим себе, что на вечной мерзлоте, имеющей отрицательную температуру, поставлено сооружение, внутри которого постоянно имеет место положительная температура (рис. 15).

Если температура внутри помещения положительна, то неизбежно протаивание мерзлоты под сооружением.

Действительно, по известному постулату Фурье, имеем:

$$dQ = -\lambda \cdot dF \cdot \frac{dt}{ds} \cdot du; \qquad (2)$$

Здесь

dQ — количество тепла,

dF — бесконечно-малая поверхность,

$\frac{dt}{ds}$ — температурный градиент (скорость падения температуры в направлении нормальном к изотермической поверхности),

λ — коэффициент теплопроводности материала,

du — бесконечно-малый промежуток времени.

Уравнение (2) показывает, что тепловой поток всегда будет иметь место при наличии разности температур между помещением и мерзлотой, так как количество тепла, теряемое зданием, будет прямо пропорционально температурному градиенту и времени. Таким образом,

передача тепла все время будет происходить, и мерзлота неизбежно протает; вопрос лишь во времени. При нетеплопроводном поле время прогревания будет больше; однако избежать его применением изоляций не представляется возможным.

Если мы будем исходить из рассмотрения процесса протаивания, причем примем во внимание скрытую теплоту плавления льда, то и в этом случае, при наличии разности температур, неизбежно протаивание мерзлоты.

Глубина протаивания, для случая линейной задачи, может быть выражена известной формулой Стефана:

$$\xi = \alpha \sqrt{u}, \qquad (3)$$

где

u — время,

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\lambda \cdot \Delta t}{k \cdot e_0}}, \qquad (4)$$

где

λ — коэффициент теплопроводности мерзлоты,

Δt — разность температур,

k — скрытая теплота плавления льда,

e_0 — объемное содержание воды в грунте.

Согласно формуле (3) и (4) глубина протаивания будет прямо пропорциональна корню квадратному из произведения разности температур на время.

Таким образом, как теоретические данные, так и рассмотренные нами ранее экспериментальные показывают, что сохранить мерзлоту применением нетеплопроводных изоляций не представляется возможным. Неизбежно, при обычной системе зданий, протаивание вечной мерзлоты.

Чтобы избежать протаивания, мы должны уничтожить тепловой поток от здания к мерзлоте или сделать его периодическим, т. е. сконструировать фундаменты таким образом, чтобы в определенное время года не только не было нагревания грунта, а, наоборот, было его остывание и промораживание. Необходимо, исходя из местных температурных условий воздуха и грунта, увлажненности деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты, а также температурного режима внутри помещения, сбалансировать количество получаемого и теряемого тепла так, чтобы верхняя граница вечной мерзлоты под зданием оставалась постоянной или же из года в год повышалась.

Таким образом, возникает необходимость расчета устойчивости состояния режима мерзлоты под сооружением. Такой расчет может быть основан лишь на методе баланса тепла,[1] причем количество тепла, выделяемое при переходе воды в лед, будет иметь первостепенное значение.

Расчеты показывают, что единственным методом сохранения режима мерзлоты под сооружением (с учетом площади застройки) является метод устройства фундаментов в виде отдельных столбов с применением проветриваемого зимой подполья. Исключение могут составлять, при некоторых условиях, сооружения, занимающие весьма

---

[1] О методе расчета устойчивости состояния режима мерзлоты см.: Н. А. Цытович. Лекции по расчету фундаментов в условиях вечной мерзлоты. Лнгр., изд. Института сооружений, 1933 г.

малую площадь в плане, когда влияние бокового промерзания грунта может компенсировать поток тепла, непрерывно выделяемый зданием. Однако вопрос о боковых влияниях достаточно сложен и в настоящее время еще не имеет своего разрешения.

Высота проветриваемого подполья должна быть рассчитана на выводе всего количества тепла, выделяемого полом здания.[1]

Исходя из конструктивных соображений, высоту проветриваемого подполья обычно принимают не менее 0,6 м.

Понижение верхней границы вечной мерзлоты под зданием может происходить не только вследствие общего нарушения режима мерзлоты под всей площадью застройки, но и вследствие передачи тепла при посредстве отдельных фундаментов. Поэтому возникает задача определить такую глубину заложения фундаментов, при которой их подошва всегда находилась бы при отрицательной температуре, т. е. возникает необходимость теплового метода расчета глубины заложения фундаментов.

Точное решение поставленной задачи весьма сложно и в настоящее время еще не получено.

Для приближенного решения существует разработанный нами тепловой метод расчета глубины заложения фундаментов, основанный на уравнениях установившегося движения тепла.[2]

Метод установившегося движения тепла может применяться для отдельных фундаментов обычных размеров, в которых, с известным допущением, можно считать движение тепла установившимся.

Что же касается массивных опор железнодорожных мостов, процесс нагревания и охлаждения которых продолжается месяцами, нельзя исходить из формул установившегося движения тепла.

Для зданий и сооружений, отапливаемых до обычной комнатной температуры, глубина заложения фундаментных столбов, при наличии проветриваемого зимой подполья, как то показывают тепловые расчеты, будет порядка удвоенной глубины деятельного слоя, однако в каждом частном случае эта глубина должна быть проверена расчетом.

Тепловые расчеты устойчивости состояния режима мерзлоты под сооружением, высоты проветриваемого подполья и глубины заложения фундаментов все же недостаточны, так как они обеспечивают лишь сооружение от просадок, но не от выпучиваний фундаментов вследствие замерзания грунтов деятельного слоя, т. е. при возведении сооружений по принципу сохранения режима мерзлоты необходимо произвести расчет фундаментов на выпучивание и определить их глубину заложения, достаточную для противодействия силам изучения.

Расчет производится на величину сил выпучивания, которые принимаются равными силам смерзания деятельного слоя с материалом фундаментов. Противодействовать выпучиванию будут: силы смерзания части фундамента, заделанной в мерзлоте, и нагрузка на фундамент.[3]

Вследствие значительной величины сил смерзания грунтов с материалом фундаментов иногда представляется затруднительным сконструировать фундаменты, противодействующие этим силам, и приходится принимать ряд мер, уменьшающих смерзание и выпучивание.

---

[1] См. предыдущую цитату.

[2] См. Н. А. Цытович. К вопросу расчета фундаментов сооружений, возводимых на вечной мерзлоте, изд. Гипромеза, 1928 г., а также — Лекции по расчету фундаментов в условиях вечной мерзлоты. Изд. Лигр. инст. соор., 1933.

[3] О расчете на выпучивание см. вышецитируемую работу: Лекции по расчету фундаментов в условиях вечной мерзлоты.

Одной из существенных мер, уменьшающих смерзание грунта деятельного слоя с фундаментами, является засыпка по всему периметру фундаментов слоем крупной сухой гальки, защищенной деревянными щитами от заливания и водонепроницаемой отмосткой от попадания атмосферных осадков. Эта мера вполне оправдала себя на практике.

Кроме того, весьма полезной мерой, уменьшающей выпучивание, является общее осушение местности канавами и дренаж надмерзлотных вод.

Таким образом, при возведении сооружений по принципу сохранения режима мерзлоты конструируют фундаменты по системе отдельных столбов с применением проветриваемого зимой подполья и с принятием тщательных мер против выпучивания фундаментов.

Рис. 16. Здание высокогорной метеорологической станции на леднике Петрова, возведенное по принципу сохранения режима мерзлоты.

В настоящее время можно привести ряд примеров возведения сооружений, сконструированных по принципу сохранения режима мерзлоты и подтверждающих правильность этого метода: старинные постройки монастыря в Якутске, постройка конторы пути на ст. Могзон в 1907 г. (инж. Нежданов), здание высокогорной метеорологической станции на леднике Петрова (инж. Блезе), изображенное на рис. 16, опытный дом с проветриваемым подпольем на ст. Сковородино и др.

VII. ПРИНЦИП УНИЧТОЖЕНИЯ РЕЖИМА МЕРЗЛОТЫ

При возведении сооружений по принципу уничтожения режима мерзлоты особое значение приобретает род грунта и его водопроницаемость. Так как в условиях вечной мерзлоты грунты бывают не только насыщены льдом, но весьма часто перенасыщены, то при оттаивании они превращаются в разжиженную массу.

Если грунт состоит из скелетной части (например, песка или гравия), то избыток воды быстро удаляется, и свойства грунта начинают улучшаться по сравнению со свойствами массы, получающейся непосредственно после оттаивания мерзлоты. Кроме того, такие строительные свойства грунтов, как несущая способность, величина осадки под нагрузкой для водопроницаемых песчаных и гравелистых грунтов, изменяются не столь значительно с изменением влажности. Поэтому возведение сооружений, конструируемых по принципу уничтожения режима мерзлоты, на грунтах крупно-зернистых хотя и имеет ряд особенностей (необходимость расчета фундаментов на выпучивание и пр.), но не встречает особых затруднений.

Совершенно иными свойствами при оттаивании обладают водонепроницаемые грунты или грунты маловодопроницаемые (глинистые и пылевато-илистые). Эти грунты при переходе из мерзлого в талое состояние превращаются в разжиженную массу, причем эта масса остается в разжиженном состоянии чрезвычайно долго и процесс уплотнения ее под действием нагрузки может продолжаться десятилетия. Разжиженные массы (глинистые и пылевато-илистые) могут воспринимать лишь ничтожнейшую нагрузку, и, практически, возведение на них сооружений без принятия специальных мер становится невозможным. Дренирование таких грунтов вследствие их малой водопроницаемости также затруднительно.

Таким образом, возводить сооружения по принципу уничтожения режима мерзлоты, без принятия специальных мер, улучшающих несущую способность оттаявшей мерзлоты, возможно лишь на крупнозернистых грунтах: песчаных, гравелистых, галечных.

К сожалению, весьма часто свойства грунтов, получающихся при оттаивании вечной мерзлоты, строителями совершенно не учитываются, что вызывает многочисленные, совершенно недопустимые, деформации сооружений.

Одним из самых существенных вопросов при расчете фундаментов сооружений, возводимых по принципу уничтожения режима мерзлоты, является определение возможной осадки фундаментов.

Вопрос об определении осадки фундаментов на оттаивающих грунтах представляется чрезвычайно сложным. Действительно, осадка фундаментов при оттаивании вечной мерзлоты будет зависеть не только от свойств грунта и размеров фундаментов, но и от процесса оттаивания, его интенсивности и пр.

Мы подошли к изучению вопроса об осадке фундаментов на оттаивающей мерзлоте чисто экспериментальным путем.

На рис. 17 представлены результаты двух лабораторных опытов по изучению осадков мерзлой глины при равномерном оттаивании без возможности бокового расширения грунта, а на рис. 18 — результаты двух опытов с песком средней крупности.

Из рассмотрения приведенных кривых заключаем, что кривая осадок водопроницаемого грунта (песка) значительно отличается от кривой осадок водонепроницаемой глины.

Такой же характер кривых осадок мерзлого грунта при оттаивании наблюдается и в естественных условиях. Так, на рис. 19 изображены кривые осадок четырех углов фундамента котла № 1 Читинской электростанции на Черновских копях. Осадка отдельных точек котла за 41 месяц достигла 200 мм, и кривая осадок по своему характеру аналогична кривым на рис. 17. Осадка фундамента котла, возведенного на

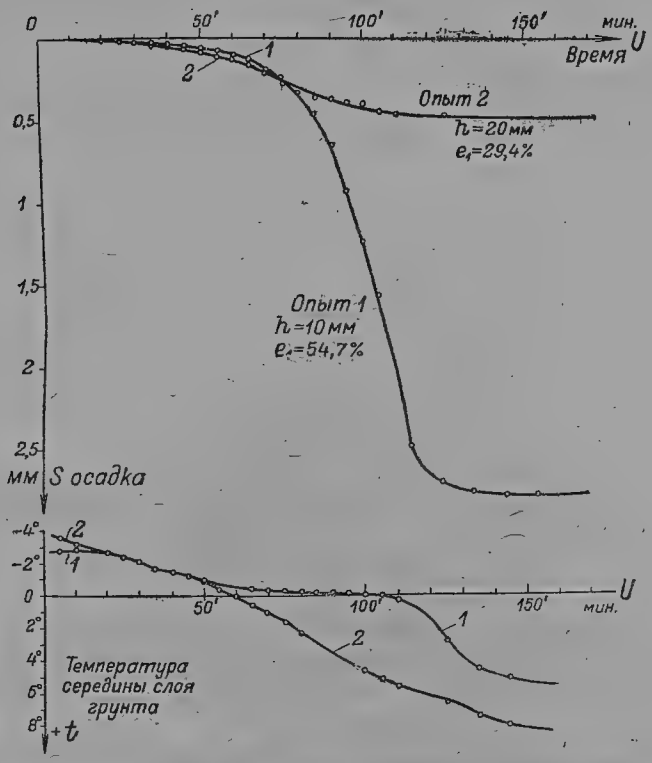


Рис. 17. Осадки слоя мерзлой глины при равномерном оттаивании без возможности бокового расширения грунта.

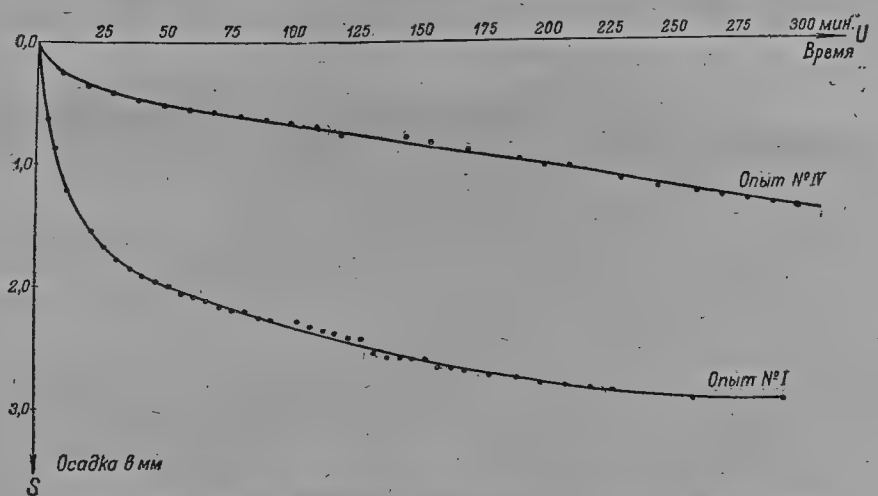


Рис. 18. Осадки жесткого штампа на оттаивающем песке.

оттаивающей мерзлой глине, еще не прекратилась, хотя и наблюдается некоторая тенденция к затуханию осадки.

Результаты произведенных нами опытов показывают, что окончательная осадка фундамента на оттаивающей вечной мерзлоте может быть определена методом эквивалентного слоя грунта, [1] если нагрузка не превосходит предела выдавливания грунта из-под фундамента.

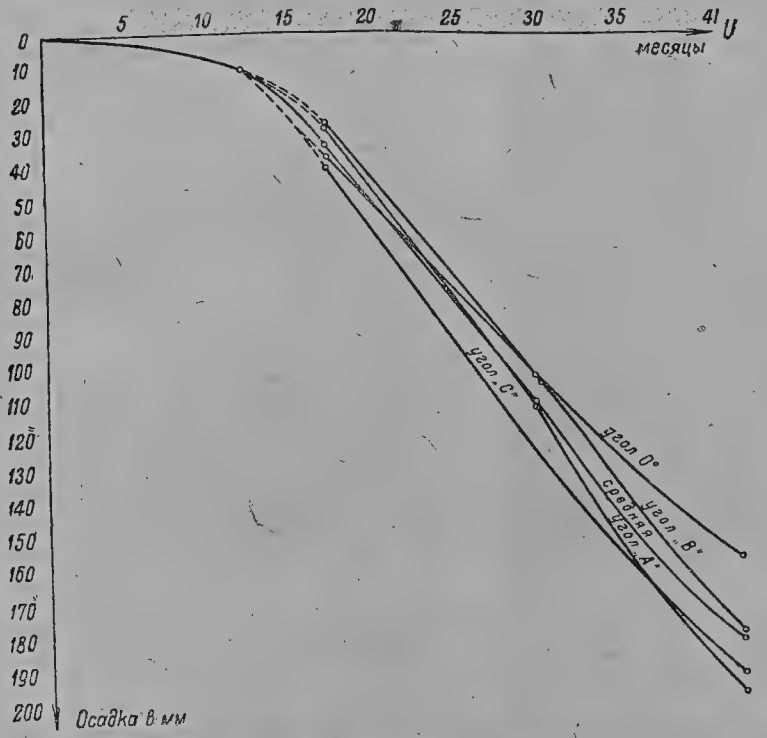


Рис. 19. Осадки котла № 1 Читинской электростанции при оттаивании вечной мерзлоты.

Вопрос же об определении осадок мерзлых грунтов при оттаивании, как функции времени, требует дальнейшего своего изучения и теоретического обобщения.

Окончательная осадка фундамента на оттаивающей мерзлоте может быть определена по формуле:

$$s = h_s \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1}, \qquad (5)$$

где

S — осадка,

h_s — мощность эквивалентного слоя грунта, [2]

ε_1 — начальный коэффициент пористости (определяется по данным объемного веса, влажности и удельного веса),

---

[1] Н. А. Цытович. Расчет осадок фундаментов, как функции времени, свойств грунта и размеров фундаментов. Изд. Института сооружений, Лнгр., 1934 г.

[2] См. также Н. А. Цытович. Основы механики грунтов, Ленинград, 1934 г.

e^2 — коэффициент пористости, соответствующий возрастанию нагрузки на величину допускаемого давления (определяется лабораторным путем или способом пробной нагрузки, пользуясь методом эквивалентного слоя).

Если при расчете осадки фундаментов получается величина осадок порядка десятков сантиметров, то это показывает, что возводить сооружение без принятия специальных мер не представляется возможным.

Такими мерами, могущими уменьшить осадки фундаментов и увеличить несущую способность основания, могут быть применение мощных песчаных подушек и устройство свайного основания.

Без применения искусственного основания (песчаного или свайного) возводить сооружения на сильно сжимаемых грунтах не представляется возможным.

Отметим, что, как и в случае возведения сооружений по принципу сохранения режима мерзлоты, здесь необходим расчет фундаментов на выпучивание. Учитывая возможность боковых давлений замерзающих слоев грунта на фундаменты, конструируют последние в виде отдельных столбов.

Меры, применяющиеся для уменьшения сил смерзания грунта деятельного слоя с материалом фундаментов, в случае возведения сооружения по принципу уничтожения режима мерзлоты или с учетом постепенного исчезновения мерзлоты, применяются те же (засыпка галькой, защищенной от заиливания, отвод дождевых и дренаж грунтовых вод), что и при возведении по принципу сохранения режима мерзлоты.

Таким образом, основными расчетами фундаментов при возведении сооружения по принципу уничтожения режима мерзлоты будут: расчет осадок фундаментов и расчет фундаментов на выпучивание. При этом допускаемое давление на грунт должно быть понижено. Применение песчаных подушек и свайных оснований, рассчитанных на условия переувлажненных талых грунтов, является целесообразным.

Н. И. ТОЛСТИХИН

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ В РАЙОНАХ МЕРЗЛОЙ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ (ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ)

Прошло сто с лишним лет со времени неудачной попытки купца Шергина в Якутске получить подземную воду в целях водоснабжения. Эта попытка наглядно показала, что без знания гидрогеологии районов мерзлой зоны (вечной мерзлоты) и без соответствующих технических средств задача получения необходимого количества подземной воды является неразрешимой. С тех пор работами целого ряда исследователей изучение вечной мерзлоты (14) и подземных вод (9) далеко подвинулось вперед.

Особенно много было сделано за три последних десятилетия в связи со строительством Транссибирской магистрали и гигантским ростом промышленных и других предприятий в послереволюционное время.

Это позволяет автору дать первую предварительную характеристику гидрогеологических условий водоснабжения в районах развития мерзлой зоны. В виду крайней ограниченности материала ряд вопросов выдвигается в статье как проблемные без разрешения их в настоящее время.

Опыт водоснабжения крупных предприятий имеется по южной окраине мерзлой зоны литосферы, в связи с чем большинство примеров взято именно из этих районов: Забайкалье, Амурская область, тогда как по водоснабжению в условиях Арктики почти нет материалов, и в значительной мере приходится прибегать к экстраполяции.

Основные данные о вечной мерзлоте на севере СССР, о поверхностных и подземных водах на территории ее распространения изложены в работе М. И. Сумгина (13).

В районах развития мерзлой зоны источниками водоснабжения могут быть:

1. Поверхностные воды рек, озер и морей, лед и снег.
2. Подземные воды и ископаемые льды.

Водою больших и малых рек в летнее время население пользуется в широких пределах. Зимою дело осложняется перемерзанием мелких рек. В связи с этим огромные районы в десятки и сотни квадратных километров естественно выключаются из водоснабжения поверхностной водой и вынуждены переходить на водоснабжение подземными водами, льдом и снегом. Только такие крупные реки, как Онон, Аргунь, Ингода, Шилка, Хилок в среднем и нижнем течении, Селенга, Амур, Зея, Бурея и др. в Забайкалье; Енисей, Лена, Яна, Индигирка, Колыма, Витим,

Вилюй, Алдан, Мая и т. п. используются круглый год населением, не промерзая до дна. Более мелководные притоки их промерзают.

Так, например, население обширной территории в десятки тысяч квадратных километров между Шилкой, Ононом и Аргунью в зимнее время почти целиком переходит на водоснабжение подземными водами, в меньшей степени используя воду омутов и лед. Население северных районов, расселяется по берегам крупных рек и не испытывает серьезных затруднений с водоснабжением. Удаление от крупных артерий неизбежно обостряет водный вопрос. Особенно недостаток в воде ощущается при необходимости постройки предприятий, потребляющих значительное количество воды, как, например, железнодорожные станции, электростанции, обогатительные фабрики, заводы и т. д. Большинство подобного рода хозяйственных и промышленных предприятий, в случае отдаленности от крупных рек, прибегает к использованию подземных вод. Иногда создаются водохранилища, опыт строительства которых в условиях мерзлой зоны недостаточно велик. Некоторые плотины, выстроенные в целях водоснабжения на ст. Амурской жел. дороги, себя не оправдали (ст. Ерофей Павлович).

При современном состоянии наших знаний, по мнению проф. М. Я. Чернышева (21), «устройство плотин и их эксплоатация является самым дорогим водопроводным сооружением и самым малонадежным в действии по сравнению с другими видами водоисточников».

Пример плотины Петровского завода, просуществовавшей с 1792 г. до наших дней, указывает, однако, на полную возможность сооружения долговечных плотин и эксплоатации водохранилищ в условиях мерзлой зоны.

Водоснабжение речною водою имеет ряд неудобств: влекомые по дну наносы, загрязнение воды, резкие изменения в режиме, донный лед, непостоянство русла и дна и др.

Использование воды озер возможно лишь в том случае, когда озеро сможет обеспечить по своему объему потребное количество воды в течение длительного зимнего периода и сможет восстановить свои ресурсы за счет притока поверхностных и подземных вод. При значительной толщине льда зимою крайне важно для успешного использования озера, чтобы оно имело достаточную глубину.

Использование воды морей для технических и питьевых надобностей крайне ограничивается как территориальным распределением, так и, в особенности, химическим составом морской воды.

Поверхностным льдом рек, озер, ледников, как источником водоснабжения, население районов мерзлой зоны пользуется издавна. В зимнее время куски льда свозятся и складываются кучами во дворе, откуда берутся по мере надобности, растаиваются и таким путем превращаются в отсутствующую поблизости в окрестностях воду. В некоторых местах лед запасается в целях водоснабжения в погребах и на лето.

Широко используется в качестве источника водоснабжения лед в полярных странах. На некоторых островах, в зимнее время в особенности, он наряду со снегом является единственным возможным источником получения пресной воды.

Одной из основных проблем использования льда в качестве источника водоснабжения является проблема наиболее экономического его растаивания.

В настоящее время уже поставлена в повестку дня идея о создании в первую половину зимы запасов льда (ледяных аккумуляторов) за счет

избытка поверхностных вод, для использования их во вторую половину зимы и ранней весной, когда нет достаточных количеств поверхностной или подземной воды (инж. Левин).

Некоторое значение имеет снег, за счет растаивания которого обеспечивается часть населения Арктики в зимнее время и весною. Проблема накопления сугробов снега в определенных местах для последующего его использования во время весеннего снеготаяния, высказанная на конференции Б. Н. Городковым, заслуживает внимания. Но вряд ли таким путем могут быть получены большие количества воды для крупных предприятий, не говоря уже об опасности загрязнения воды и др.

Недостатки использования поверхностного льда и снега вытекают из сезонности такого использования. То же самое относится и к эксплоатации в целях водоснабжения небольших рек и ручьев, промерзающих зимою. В этом отношении огромное преимущество имеют подземные воды, которые, при благоприятной гидрогеологической обстановке, отличаются весьма большим постоянством состава, температуры и дебита и могут быть равномерно использованными в течение целого года.

Роль подземных вод в водоснабжении предприятий и населения районов мерзлой зоны чрезвычайно велика. Значительное число поселений, хозяйственных, промышленных и железнодорожных предприятий обеспечивается в настоящее время подземными водами. Из городов подземные воды используют: Чита, Троицкосавск, Нерчинский завод, большинство станций Амурской и значительная часть станций Забайкальской ж. д., заводы, фабрики, рудники — Калангуй, Халчеранга и т. д.

Каковы же гидрогеологические условия поисков, разведки и использования подземных вод? Остановимся прежде всего на особенностях подземных вод.

Мерзлая зона делит воды на:

I. Надмерзлотные.

II. Межмерзлотные.

III. Подмерзлотные.

Краткая характеристика этих вод и условий их залегания дана, преимущественно для Забайкалья, в предыдущих работах автора (16, 17). Здесь обратим внимание на условия использования подземных вод в целях водоснабжения и оттеним некоторые особенности этих вод для северных районов.

I. НАДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ

Надмерзлотные воды залегают на мерзлой зоне, как на водоупорном основании. Обычно они приурочены к отрицательным формам рельефа и встречаются в четвертичных отложениях на дне речных долин и озерных котловин, реже у подошвы склонов и на водоразделах.

В условиях плоских водоразделов и междуречных пространств они также широко распространены.

Характерной особенностью этих вод является постоянная смена и взаимные переходы твердой и жидкой фазы в течение года. При этом длительность существования жидкой фазы в условиях Арктики выражается двумя-тремя осенними месяцами. Следовательно, возможности эксплоатации надмерзлотных вод в условиях Арктики будут весьма ограничены во времени. В дальнейшем мы будем говорить о жидкой фазе по преимуществу.

Зеркало надмерзлотных вод следует согласно с верхней поверхностью мерзлой зоны. В общем случае оно залегает эквидистантно по отношению к поверхности земли.

Поэтому обычно надмерзлотные воды движутся согласно с уклоном местности, т. е. сверху вниз по долине рек и т. п.

Глубина оттаивания деятельного слоя, а следовательно и возможная мощность надмерзлотного горизонта уменьшается с юга на север. В Южном Забайкалье глубина промерзания и оттаивания по данным работ С. В. Комиссарова и Борзинской метеорологической станции достигает 5—6 м, тогда как севернее, на ст. Бомнак, оттаивание не распространяется на пределы 2—3 м, а для Крайнего Севера М. Г. Сумгин указывает на возможную глубину для песчаных горизонтов в 1—2 м, а для глинистых — в несколько десятков см. Ничтожная мощность надмерзлотного горизонта в условиях Арктики при краткости его талого существования лишает данный горизонт всякого практического интереса.

Залегая на мерзлой зоне, надмерзлотные воды влияют на ее поверхность теплофицирующим образом там, где они движутся со значительной скоростью и, следовательно, проносят достаточное для этого количество тепла (1). Так, в гравелистых и галечных водоносных грунтах оттаивание при прочих равных условиях протекает быстрее, чем в супесях, а тем более в глинистых породах, где условия движения подземных вод исключительно неблагоприятны. Двигающиеся по поверхности мерзлой зоны надмерзлотные воды как бы оплавляют и разъедают эту поверхность, создавая нередко причудливый характер ее залегания.

Питаются надмерзлотные воды в основном за счет атмосферных осадков, поверхностных и реже более глубоких подземных вод, а также конденсации паров на охлажденной мерзлой поверхности оттаивающего деятельного слоя.

Большое значение в питании надмерзлотных вод должны иметь морозные трещины, рассекающие деятельный слой на сеть полигонов в 10—30 м диаметром, глубиною на юге до 1—2 м, при ширине в несколько см. В такие трещины, пока они не заилены, во время выпадения дождей поглощается значительное количество воды.

Для южных районов, где зимнее промерзание не всегда соединяется с мерзлой зоной, питание надмерзлотных вод за счет оттаивания наледей наблюдалось в марте, апреле, несмотря на двухметровый горизонт зимнего промерзания. Проникновение воды сквозь подобного рода мерзлый горизонт может быть объяснено наличием морозных трещин. Так как основными источниками питания надмерзлотных вод являются атмосферные осадки, то вследствие совпадения области питания и залегания надмерзлотных вод наблюдается полная зависимость между количеством выпадающих осадков и водообильностью горизонта во времени. В некоторых местах сезонность надмерзлотных вод резко подчеркнута — они появляются с наступлением дождей, а по окончании дождливого периода горизонт осушается, так как вода стекает в пониженные участки. Соответственно в дождливое время повышается уровень воды в колодцах, питающихся надмерзлотными водами, тогда как позднее уровень воды в них падает, а некоторые колодцы совершенно иссякают.

При разведке на воду этот горизонт может быть легко пропущен в зимнее и весеннее время, когда вода его находится в твердой фазе.

Поэтому делать какие бы то ни было заключения о наличии или отсутствии надмерзлотных вод в районах мерзлой зоны по весенним выработкам следует с крайней осторожностью. Скважины и шурфы нередко вскрывают осенью подземную воду там, где весною о возможном присутствии ее нечего было и думать, где выработками она не была встречена.

Вблизи источников, выносящих подмерзлотные воды, большей частью возникает местный очаг развития надмерзлотных вод, питание которых обусловлено за счет первых.

Фонтанирующие скважины могут сделаться центром возникновения местного надмерзлотного горизонта и испортить строительные свойства участка, что особенно важно учитывать при инженерно-геологических изысканиях, принимая соответствующие защитные мероприятия, например, томпанаж скважин.

Режим надмерзлотного горизонта, по данным забайкальских и др. гидрогеологических партий (С. В. Комиссаров, И. Я. Баранов и др. (1), характеризуется подъемом воды в конце июля (начало дождливого периода) до начала сентября. Затем до декабря уровень несколько понижается. В январе наблюдается некоторый подъем, иногда сопровождаемый вторым циклом наледеобразования, объясняемый началом промерзания водоносного горизонта. Затем уровень вновь понижается. В некоторых колодцах отмечается небольшой временный подъем уровня весною. В Арктике жизнь надмерзлотного горизонта протекает в короткий промежуток времени с июня по ноябрь. Остальное время года горизонт находится в мерзлом состоянии.

Температура надмерзлотных вод колеблется от 0 до 4°, повышаясь в период максимальной температуры воздуха и снижаясь к зиме.

Химический состав изменяется по мере движения вод с гор в равнину. При благоприятных условиях засолонения вблизи соленых озер и солонцев минерализация вод увеличивается. Наименьшая минерализация совпадает с более высоким уровнем воды, что объясняется разбавлением подземных вод выпадающими атмосферными осадками. Накануне промерзания минерализация достигает наиболее высоких цифр, ибо сам процесс промерзания способствует не только перераспределению воды в надмерзлотном горизонте, повышая содержание воды в его основании, но и концентрирует содержание солей в остающейся воде. Однако процесс этих изменений еще не изучен.

Надмерзлотные воды являются первым от поверхности земли водоносным горизонтом. Его нетрудно вскрыть колодцем или буровой скважиной, особенно в летне-осеннее время. Рассмотрим работу выработки (колодца, скважины) в условиях эксплоатации надмерзлотного водоносного горизонта. Работа эксплоатационной выработки будет прежде всего характеризоваться резкой сезонностью.

При условии некоторой однородности песчано-гравелистого грунта дебит (Q) выработки летом (см. рис. 1) будет определяться формулой:

$$Q = \pi K \frac{y^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}} = \pi K S \frac{(2y - S)}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{1{,}37\, KS(2y - S)}{\lg R - \lg r}, \qquad (1)$$

где

Q — дебит выработки,
K — коэффициент фильтрации,

y — мощность оттаявшей части водоносного надмерзлотного горизонта (H),

h — высота столба воды в выработке над мерзлым слоем во время откачки,

R — радиус депрессионной воронки,

r — радиус выработки,

S — стационарное понижение уровня воды в выработке при ее откачке.

В условиях обычного грунтового потока, вне мерзлой зоны, величина y, представляющая для нас в данном случае наибольший интерес, зависит от колебания уровня воды. В условиях надмерзлотных вод она зависит не только от колебания уровня, но и от оттаивания деятельного слоя, иначе говоря:

$$y = D - (x + z) = u - x, \quad (2)$$

где

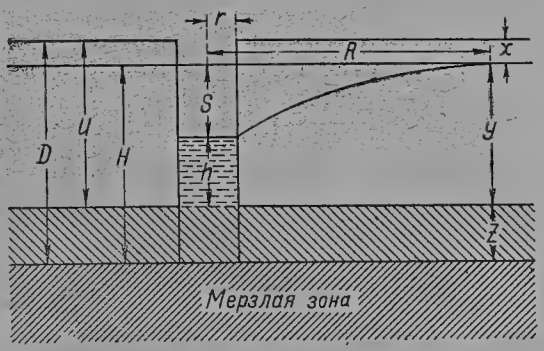


Рис. 1. Разрез колодца летом. Надмерзлотный водоносный горизонт оттаял на глубину y, см.

D — деятельный слой,

x — глубина залегания уровня подземных вод от поверхности земли,

u — мощность слоя оттаивания,

z — мощность неоттаявшей части деятельного слоя во время откачки.

От весны к глубокой осени величина протаивания (u) деятельного слоя постепенно возрастает, достигая своего максимума осенью, когда она равна деятельному слою: $u = D$.

Оттаивание на севере начинается в мае—июне, заканчивается оно в сентябре, а в ноябре зимнее промерзание сходится с мерзлой зоной. Следовательно, рабочее время выработки, в течение которого ее можно эксплоатировать, определяется в 2—3½ месяца. Такой короткий срок возможной эксплоатации лишний раз подчеркивает весьма малую роль надмерзлотных вод в водоснабжении Севера.

Возможны пять случаев изменения величины y — мощности оттаивающей части надмерзлотного горизонта, если принять постепенное уменьшение величины Z с весны до осени.

1-й случай. Величина x уменьшается.	Величина y, а следовательно и дебит[1] колодца возрастает.
2-й случай. Величина x остается без перемен.	
3-й случай. Величина x увеличивается со скоростью меньшей, чем та, с которой уменьшается величина z.	
4-й случай. Величина x увеличивается настолько, насколько z уменьшается.	y и Q без перемен.
5-й случай. Величина x увеличивается скорее, чем убывает z.	y и Q уменьшаются.

[1] Имеется в виду максимальный дебит колодца.

Очевидно при $x + z = D$ величина $y = 0$, и колодец становится безводным.

Так как величина z, постепенно уменьшаясь, осенью становится равной 0, то осенью во время максимального оттаивания деятельного слоя величина y будет зависеть только от x и следовательно:

$$y = D - x \qquad (3)$$

Отсюда дебит колодца будет находиться в зависимости только от глубины залегания уровня воды, с подъемом уровня он будет возрастать, с понижением — падать, при неподвижности уровня стояния воды будет оставаться постоянным.

Из вышеприведенного разбора зависимости дебита колодца от величины y вытекает, что при одном и том же уровне стояния воды дебит колодца может оставаться неизменным (осень) или постепенно возрастать (от весны к осени). При понижении уровня воды в колодце дебит его может увеличиться, уменьшиться или оставаться без перемен в зависимости от скорости оттаивания. Скорость оттаивания (V) определяется из отношения:

$$V = \frac{U}{T}, \qquad (4)$$

где

U — мощность слоя оттаивания в см,

T — время в сутках, потребовавшееся на образование оттаявшего слоя U.

Скорость оттаивания возрастает к лету и убывает до 0 к осени. Средняя скорость оттаивания в грубых цифрах для разных районов выражается так:

Ю. Забайкалье	3,8	см/сутки
Бомнак	1,3	„ „
С. Казачье на Яне летом	1,0	„ „
„ „ „ в августе	0,5	„ „

Вполне очевидно, что скорость оттаивания зависит от теплопроводности грунта и целого ряда других факторов.

В виду большого значения определения глубины оттаивания (U) деятельного слоя можно привести здесь приблизительный способ определения этой величины, основанной на данных опытной откачки.[1] Из формулы 1 вытекает, что

$$y = 0{,}5\left[\frac{Q(\lg R - \lg r)}{1{,}37KS} + S\right] \qquad (5)$$

Получив величину y, по формуле 5 не трудно определить и глубину оттаивания деятельного слоя (U):

$$U = y + x \qquad (6)$$

Если при первой откачке глубина оттаивания (y) водоносного

---

[1] Как известно, существует несколько приемов определения глубины оттаивания: 1) непосредственные определения путем заложения выработки, 2) термометрическими замерами в заранее подготовленных скважинах, 3) геофизическим методом и другие.

слоя определена непосредственным измерением, то мощность водоносного слоя (y) при повторной откачке определяется из формулы:

$$y_2 = 0{,}5\left[\frac{Q_2 \cdot S_1(2y_1 - S_1)\cdot \ln\frac{R_2}{r}}{Q_1 S_2 \ln\frac{R_1}{r}} + S_2\right] \qquad (7)$$

где

Q_1 — дебит колодца при первой откачке,
Q_2 — дебит колодца при второй откачке,
S_1 — глубина депрессии при первой откачке,
S_2 — глубина депрессии при второй откачке,
R_1 — радиус депрессии при первой откачке,
R_2 — радиус депрессии при второй откачке,
y_1 — мощность оттаявшего водоносного горизонта при первой откачке,
r — радиус выработки.

Если допустить, что $S_1 = S_2$ и $\ln\frac{R_1}{r} = \ln\frac{R_2}{r}$, то получим:

$$y_2 = 0{,}5\left[\frac{Q_2(2y_1 - S_1)}{Q_1} + S_2\right] \qquad (8)$$

Производя откачку осенью (в сентябре), можно определить полную мощность деятельного слоя. Разумеется, что эти формулы дают лишь приблизительное определение глубины оттаивания при сравнительно однородном водопроводящем слое.

В случае неоднородности строения водоносного горизонта дебит выработки будет изменяться в связи с оттаиванием не только потому, что будет варьировать мощность горизонта, но и от перемены гидрогеологических его свойств присоединением оттаявшей части слоя.

Процессы смерзания и оттаивания влекут за собою перегруппировку частиц грунта в пределах деятельного слоя. В результате этого процесса обломки отдельных горных пород с течением времени оказываются перенесенными в верхние слои грунта. По этим обломкам в известных случаях можно определить, из каких пород сложены скрытые нижние слои его. Г. М. Икин [1] дал подобного рода явлениям, происходящим в деятельном слое с обломками горных пород при промерзании и оттаивании, название «альтипланация». Этот процесс достаточно изучен и в нашей литературе. Выдергивание столбов, свай и т. п. представляют собою явления того же порядка. Для иллюстрации привожу зарисовку (рис. 2) большого камня, который, по словам жителей пос. Шадорон, «лезет из-под земли». В связи с подобного рода и некоторыми другими процессами в основании деятельного слоя, наоборот, нередко происходит накопление мелкоземистой части грунта, которая, будучи пресыщена водою, превращается в так называемый плывун. Таким путем первоначально гидрогеологически однородный грунт может превратиться в неоднородный.

Вследствие того, что мощность надмерзлотного горизонта в условиях Севера не превосходит 1 м, производительность колодцев не мо-

[1] Вашингтонская Акад. наук 1914 г. Взято из Engineering and Mining Journal. I. 1932. Glaciation, Depht of Frust and Ice weins of Keno Hill and Yicinty, Yukon Territory. Zevingston wernecke.

жет быть большой и рассчитывать на эксплоатацию надмерзлотных вод для крупных предприятий не приходится. Это касается в особенности зимы и весны, когда деятельный слой, а с ним и надмерзлотный водоносный горизонт нацело промерзают. На полную свою мощность надмерзлотный горизонт может питать колодцы только в августе — сентябре, т. е. весьма ограниченный отрезок времени.

Зимою производительность выработки снижается в связи с прекращением питания надмерзлотных вод и постепенным промерзанием

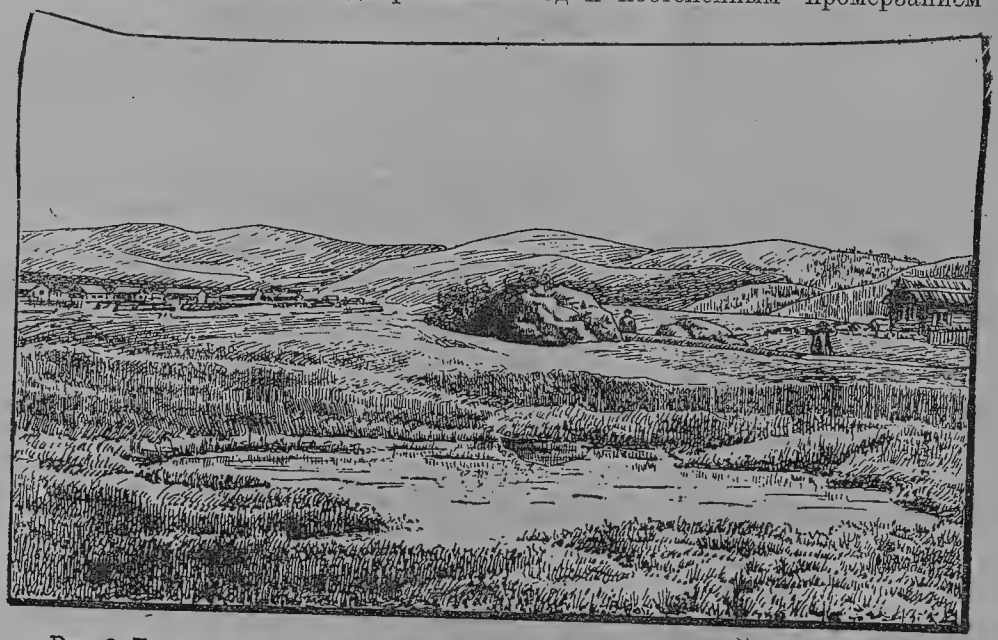


Рис. 2. Большой камень в пойме р. Шадорон, выпираемый из земли процессами альтипланации (Вост. Забайкалье).

горизонта. Водоносный горизонт становится напорным. Производительность выработки зимой (см. рис. 3) рассчитывается по иной формуле:

$$Q = 2\pi K \frac{y(H-h)}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2\pi KyS}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2{,}73KyS}{\lg R - \lg r}, \qquad (9)$$

где

Q — дебит колодца зимой,

y — мощность оставшейся непромороженной части надмерзлотного горизонта,

H — высота напора над основанием водоносного горизонта,

h — высота столба воды в выработке во время откачки,

R — радиус депрессионной воронки,

r — радиус выработки,

$S = H - h$ — понижение уровня воды при откачке.

Здесь особый интерес представляет величина y — мощность той части водоносного горизонта, которая осталась непромороженной. В обычном случае артезианских вод y (мощность слоя) остается постоянной для данного колодца или скважины. В условиях надмерзлотных вод она постепенно уменьшается с началом зимы к весне.

Для Арктики величина y изменяется в пределах от 1 и до 0. Совершенно ясно, что при уменьшении величины y вследствие промерзания надмерзлотных вод дебит колодца будет падать даже в случае сохранения зеркала подземных вод на одном и том же уровне.

При полном промерзании $y = 0$, и дебит колодца будет тоже $= 0$. Следовательно, кривая производительности колодца в течение года будет иметь максимум в осеннее время и минимум (до 0) в зимнее и весеннее — для периферии, а для центральных районов мерзлой зоны минимум в 0 наступит в ноябре — декабре.

Производя последовательно откачку из выработки летом, а затем зимою, можно определить глубину промерзания (Z) деятельного слоя по формуле:

$$Z = D - y, \tag{10}$$

где

D — мощность деятельного слоя, которая может быть определена при помощи осенней откачки или другим способом,

y — оставшаяся непромороженной часть водоносного горизонта.

Величина y определяется по следующим приближенным формулам: [1]

$$y = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{2\pi KS} = \frac{Q(\lg R - \lg r)}{2{,}73KS} \tag{11}$$

где обозначения те же, что и в предыдущих формулах (9 и 10).

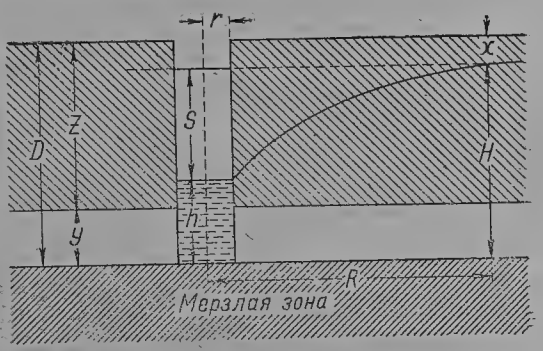


Рис. 3. Разрез колодца зимою. Деятельный слой промерз на z см. Сохранилась от промерзания часть водоносного горизонта, равная y см.

Если имеются данные по летней откачке и мощности водоносного горизонта, то мощность оставшейся от промерзания части водоносного горизонта (y_2) определяется по следующей формуле:

$$y_2 = \frac{S_1(2y_1 - S_1) \cdot \ln \frac{R_2}{r} \cdot Q_2}{2S_2 \cdot \ln \frac{R_1}{r} \cdot Q_1} \tag{12}$$

При условии, что $S_1 = S_2$ и $R_1 = R_2$ получим:

$$y_2 = \frac{Q_2(2y_1 - S_1)}{2Q_1}, \tag{13}$$

где для формул 12 и 13:

y_2 — оставшаяся незамерзшей часть водного слоя,
y_1 — мощность водоносного слоя,
S_1 — глубина депрессии,
R_1 — радиус депрессии,
Q_1 — дебит выработки,

} При откачке летом.

[1] Здесь не рассматриваются другие способы определения y — непосредственным замером, геофизическим и др.

S_2 — глубина депрессии,
R_2 — радиус депрессии,
Q_2 — дебит колодца.
} При откачке зимою.

По последней приближенной формуле была определена глубина промерзания в районе расположения одного колодца в Ю. Забайкалье.

Имеем:

$Q_1 = 45$ м³/час — производительность колодца при первой откачке;

$Q_2 = 24$ м³/час — производительность того же колодца после частичного промерзания водоносного горизонта;

$y_1 = 1{,}52$ — мощность водоносного горизонта при первой откачке:

$D = 2{,}50$ — мощность деятельного слоя.

Глубина залегания уровня воды (x) в первом и втором случаях была примерно одинаковой.

Из формулы путем подстановки получим:

$$y_2 = \frac{(2y_1 - S_1)Q_2}{2Q_1} = \frac{(2 \cdot 1{,}52 - 1{,}40)24}{2 \cdot 45} = 0{,}45.$$

Отсюда глубина промерзания деятельного слоя:

$$z = D - y = 2{,}50 - 0{,}44 = 2{,}04.$$

Шурфом, заложенным вблизи опытного колодца, величина промерзания деятельного слоя определилась в 1,90 м. Другим шурфом глубина промерзания была определена в 2 м. Таким путем грубая применимость вышеприводимой формулы оправдалась. Проверка по данным второго опытного колодца подтвердила правильность определения глубины промерзания по вышеприводимой формуле.

Здесь следует оговориться, что формула эта приближенная и предполагает сравнительно однородное строение водоносного горизонта. Будет крайне полезно проверить ее применимость в отдельных случаях.

Значение определения степени промерзания деятельного слоя чрезвычайно ясно подчеркивается при эксплоатации надмерзлотного горизонта, ибо оно дает возможность судить об оставшихся резервах подземных вод. В связи с промерзанием и с уменьшением величины y могут быть следующие соотношения между уровнем стояния воды в выработке до откачки и максимальным дебитом Q выработки при производстве откачки.

1-й случай. Уровень воды в колодце возрастает быстрее, чем идет уменьшение y. } Q возрастает.

2-й случай. Уровень в колодце возрастает во столько, во сколько уменьшается y. } Дебит остается без перемен.

3-й случай. Уровень в колодце возрастает медленнее, чем уменьшается y.
4-й случай. Уровень воды в колодце остается постоянным, величина y убывает.
5-й случай. Уровень воды в колодце падает.
} Q уменьшается.

6-й случай. Уровень воды в колодце остается постоянным, величина y также не изменяется. } Q остается без изменений.

Совершенно очевидно, что при одном и том же уровне стояния воды в колодце зимой и летом ($x = x_2$) производительность колодца зи-

мой будет меньше. Она определяется следующей ориентировочной формулой:

$$Q_2 = \frac{2Q_1 y_2}{H+h} = \frac{2Q_1 (D-z)}{H+h}, \qquad (14)$$

где

Q_2 — зимний расход при максимальном понижении,
Q_1 — летний расход при максимальном понижении,
y_2 — оставшийся непромороженным водоносный слой: $y_2 = D - z$,
D — мощность деятельного слоя,
z — глубина промерзания деятельного слоя,
H — мощность водоносного горизонта,
h — высота столба воды в выработке над мерзлой зоной при откачке.

Пример. Один из колодцев в Ю. Забайкалье имел Q_1 летом 12,6 м³/час при максимальном понижении.

$$H = 1{,}40$$
$$h = 0{,}10$$
$$D = 2{,}20$$
$$z = 1{,}96$$

Отсюда $y_2 = D - z = 2{,}20 - 1{,}96 = 0{,}24$.

Расход колодца зимой (Q_2) получим согласно формуле (14)

$$Q = \frac{2Q_1 \cdot y_2}{H+h} = \frac{2 \cdot 12{,}6 \cdot 0{,}24}{1{,}40 + 0{,}10} = 4{,}03 \text{ м}^3/\text{час}$$

Краткосрочная откачка из колодца дала величину 4,4 м³/час и подтвердила возможность предварительного применения данной формулы.

Итак, наряду с учетом скорости оттаивания в летнее время, для зимы приобретает значение определение скорости промерзания (v):

$$v = \frac{z}{T}, \qquad (15)$$

где

z — мощность слоя промерзания в см,
T — время, потребовавшееся на образование слоя z в сутках.

Из всего вышеизложенного вытекает, что учет и динамика ресурсов подземных вод 1-го горизонта не может прослеживаться только по колебанию уровня воды в наблюдательных выработках, но требует обязательного выяснения процесса оттаивания и промерзания водоносного горизонта. Тем самым неизбежно необходимы повторные откачки и наблюдения за колебанием уровня и температурным режимом надмерзлотного горизнота. Последние имеют контрольный характер и, наряду с наблюдениями за движнием уровня подземных вод, должны дать ориентировочные указания относительно времени производства откачек.

Колебания уровня в зимнее время имеют различный характер. Падение уровня в начале промерзания может смениться в дальнейшем его подъемом, обусловленным тем, что подземный поток вследствие промерзания его не в состоянии вместить всей двигающейся в нем воды. Возникающий напор меняет характер и распределение скоростей подземного потока и производит ряд нарушений в его гидрологической жизни: изменения направления движения отдельных участков подземного потока, разрыв промерзшего слоя, излияние воды на поверхность и т. п.

Неблагоприятные условия залегания надмерзлотных вод в отношении водоснабжения усугубляются нередко значительным содержанием глинистых частиц, легкой загрязненностью данного водоносного горизонта и пр.

Помимо неблагоприятных гидрогеологических свойств данного горизонта, использование его колодцами и буровыми скважинами без отепления влечет за собою перемерзание воды и образование ледяных пробок в колодцах и скважинах.

Через стенки колодца происходит энергичное промораживание горизонта, изолирующее его от данной выработки путем образования чехла из оледенелых пород. В виду этого полезно отеплять колодец. Колодцы, заложенные в отапливаемых помещениях, работают более исправно, и сезон их эксплоатации удлиняется вследствие того, что под отапливаемым помещением происходит протаивание поверхности мерзлой зоны, в связи с которым возрастает H — мощность водоносного горизонта под отепленным помещением и создается небольшой водный резерв. При благоприятном гидрогеологическом строении, значительной теплоотдаче из здания в грунт, малой мощности мерзлой зоны возможно протаивание последней до подмерзлотного горизонта и переключение на использование последнего.

Производительность отдельных колодцев, эксплоатирующих надмерзлотные воды, по данным С. В. Комиссарова, для Ю. Забайкалья колебалась от 0,01 до 0,2 литр/сек. Она заметно возрастает для колодцев, заложенных вблизи рек, источников в летнее время, в связи с оттаиванием деятельного слоя. При разведках полезных ископаемых в долинах рек надмерзлотные воды нередко заливают выработки. При слабых водоотливных средствах борьба с ними становится затруднительной, особенно в период дождей, а иногда и бесполезной. Создается видимость чрезвычайного водообилия надмерзлотного горизонта. Неопытные работники могут сделать на основании этого необоснованные выводы и провести ошибочные мероприятия по водоснабжению. Следует твердо помнить, что в большинстве случаев количество надмерзлотных вод невелико, тем более в условиях Арктики. Водообильность колодцев и шахт осенью в период дождей или вблизи рек зимою может снизиться до нуля.

Как сказано выше, малая мощность надмерзлотного горизонта характерна для него как правило. Но в отдельных случаях мощность надмерзлотного горизонта значительно возрастает.

Увеличение происходит в зависимости от внутренних и от внешних причин. Опыт показал, что в условиях аллювиального потока водообилие горизонта увеличивается в направлении от слабо водопроводящих участков породы к участкам с хорошей водопроводящей способностью.

Значительную роль в увеличении мощности надмерзлотного потока играют реки и озера. Под непромерзающими зимою реками залегает обычно более мощный надмерзлотный горизонт, который может иметь и практический интерес. То же касается крупных непромерзающих озер. В отдельных случаях под такими реками, как Лена, Енисей, мерзлота, повидимому, отсутствует совершенно, здесь надмерзлотные и подмерзлотные воды при благоприятных гидрогеологических условиях могут сообщаться, и, следовательно, условия эксплоатации надмерзлотных вод несколько улучшаются.

Более благоприятны условия и возможности эксплоатации надмерзлотных вод в периферических частях области мерзлой зоны, где

этот горизонт в некоторых случаях не промерзает зимою и может использоваться круглый год.

В отдельных редких случаях, когда подмерзлотные воды питаются за счет восходящих подмерзлотных вод, в месте выхода последних создается таликовая воронка, обращенная вершиной вниз. В пределах такой воронки эксплоатация надмерзлотных «паразитических» вод также может осуществляться целый год непрерывно при прочих благоприятных гидрогеологических условиях.

Итак, в основном надмерзлотные воды Арктики непригодны для целей водоснабжения, но их следует хорошо знать и изучить, чтобы избежать возможных ошибок при обосновании водоснабжения, чтобы уметь отличить эти воды от других, более глубоко залегающих и нередко более надежных. Кроме того, необходимо тщательно учитывать присутствие надмерзлотных вод на строительных площадках, ибо они являются одним из главных виновников деформации различных сооружений.

Гидрогеологические условия существования надмерзлотных вод предопределяют и характер водозаборных сооружений для их эксплоатации. Такими сооружениями могут быть колодцы, буровые скважины, подземные водосборные галереи.

Колодцы наиболее исправно работают в отапливаемых помещениях. В необогреваемом колодце стенки его должны быть окружены чистой галькой (и не глиняной забивкой) во избежание преждевременного разрушения колодца в результате процессов, связанных с зимним промерзанием. «Устье колодца должно иметь подсыпку на возможно большом радиусе» (21).

Для защиты от охлаждения стенок колодца он должен иметь плотную двойную крышку с воздушной или войлочной прослойкой между стенками. Внутренний диаметр колодца должен быть по возможности небольшим.

В случае промерзания колодца зимою для того, чтобы привести его в пригодное состояние, следует очистить колодец от льда и загрузить накаленными камнями для оттайки промороженных стенок и грунта вокруг колодца. Можно применить и паровую оттайку.

Буровая скважина, обсаженная трубой с фильтром, может заменить колодец в том случае, когда не имеется возможности теплофицировать последний.

Во избежание выдергивания трубы при зимнем промерзании можно рекомендовать загрузку обсадной трубы в грунт с таким расчетом, чтобы в мерзлую зону труба была опущена на расстояние, равное удвоенной мощности горизонта максимального летнего оттаивания. Отверстие скважины закрывается деревянной пробкой. Извлечение воды производится ручным насосом.

Водосборные галереи должны дать наиболее совершенный захват надмерзлотных вод. Они располагаются перпендикулярно движению надмерзлотных вод, врезаясь на некоторую глубину в толщу мерзлой зоны. Во избежание промерзания галереи над ней устраивается насыпь высотой до 2 м. Кроме того, весьма полезно галереи отогревать пропуском через специальные трубы пара или горячей водой. Ниже галереи по течению подземных вод полезно создать мерзлотный пояс, с целью преградить сток подземным водам.

Определение производительности каптажных сооружений необходимо делать в феврале — марте.

Эксплоатация надмерзлотных вод может производиться в целях водоснабжения небольших хозяйств и предприятий с малой потребностью в воде. Режим надмерзлотного горизонта должен характеризоваться тем, что зимнее промерзание не соединяется с мерзлой зоной и производительность оставшейся непромороженной части водоносного горизонта (в суровый год) может обеспечить потребное количество воды. Кроме того, использование надмерзлотного горизонта допустимо летом и осенью для сезонных работ даже и в случае полного промерзания его зимою.

В виду малого практического интереса с точки зрения водоснабжения надмерзлотного горизонта больше на нем не останавливаемся; сошлемся на работу А. В. Львова (9), в которой с достаточной обстоятельностью описана неудачная попытка эксплоатировать надмерзлотные воды на ст. Зилово Амурской ж. д., и перейдем к характеристике межмерзлотных вод.

II. МЕЖМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ

В противоположность надмерзлотным водам, твердая и жидкая фаза межмерзлотных вод находится в довольно устойчивом равновесии. Сущность его заключается в том, что суточные и годовые климатические колебания не оказывают влияния на мерзлую зону, а только процессы многолетних («вековых») климатических изменений, сопровождающиеся длительным теплоизлучением земной коры или, наоборот, поступлением тепла извне, оказывают воздействие на температуру мерзлой зоны и обусловливают перераспределение твердой и жидкой фаз межмерзлотных вод. Этот процесс сопровождается увеличением межмерзлотных льдов и процессом оледенения литосферы за счет таликов при охлаждении или, наоборот, возрастанием жидкой фазы за счет твердой в связи с наступившим потеплением в зоне мерзлоты.

Подобно тому, как суточные колебания передаются в толщу земной коры волнообразно, отличаясь малым периодом колебаний (24 часа) и небольшой их амплитудой (несколько см), годовые колебания передаются с периодом в один год и с амплитудой в несколько метров, так и многолетние «вековые» периодические колебания климата должны передаваться волнообразно в толщу мерзлой зоны на сотни метров, вызывая повышение температур в одних ее частях и понижение в других.[1]

Это волнообразное излучение тепла мерзлой зоной, происходящее периодически, должно способствовать оледенению пород в одно время (суровые «века»), и, обратно, переходу льда в промежуточное время (теплые «века») в воду.

Передача волны холода с поверхности в глубину должна происходить с весьма значительным опозданием, на многие десятки и сотни лет, и, следовательно, на различных горизонтах мерзлой зоны по вертикали процессы перехода твердой фазы в жидкую и обратно могут не совпадать.

Волновые движения теплоизлучения должны обусловить периодическое увеличение или уменьшение общей мощности мерзлой зоны.

---

[1] С этой точки зрения особый интерес представляют изменения в распределении температур в Шергинской шахте, произошедшие со времени наблюдений Миддендорфа и обнаруженные по данным температурных промеров, сделанных в последние годы, о чем см. в статье М. И. Сумгина (13).

Весь этот исторически развивающийся процесс оледенения горных пород литосферы, находящийся в функциональной зависимости от развития климата земного шара, подобно осцилляционным колебательным движениям ледников, наиболее явственно может быть прослежен по периферии района мерзлой зоны. В пределах Арктики он должен наблюдаться на Северном Урале и прилегающих к нему с востока и запада низменностях.

В центральных частях области развития мерзлой зоны наблюдаются ее поражающие мощности, достигающие свыше 100 м, по данным непосредственных замеров в Якутске, до 150, 200 и более метров для северных окраин Арктики (по еще не проверенным данным). Цифры говорят о том, что охлаждающее земную кору влияние климатических факторов передается на несколько сот метров в глубину и содействует увеличению количества межмерзлотных вод в твердой фазе в центральных районах развития мерзлоты. С подобной точки зрения становится понятным, что Арктика является страной классического развития твердой фазы межмерзлотных вод — льдов.

Вполне очевидно, что в тех областях земной коры, где процессы поступления тепла преобладают над процессами теплоизлучения, мы должны иметь некоторый «перегрев» в верхних частях земной коры. Вся она, повидимому, может быть разделена на области охлаждения и области перегрева, связанные взаимными переходами, причем пояс температурных нарушений, обусловленный влиянием климатических факторов, распространяется в толщу оболочки земной коры на несколько сот метров.

Итак, в пределах мерзлой зоны следует различать твердую фазу межмерзлотных вод — льды, жидкую фазу — воду. Ископаемые льды в больших массах имеют широкое распространение на территории Арктики, особенно в восточной ее половине. Они встречаются также пластами и линзами в других районах развития мерзлоты. Так, недавно линзы ископаемого льда в несколько метров мощности были вскрыты буровыми скважинами в Юго-Восточном Забайкалье, в непосредственной близости к южной границе мерзлоты. Они залегают здесь на обширной территории во много квадратных километров.

Условия и формы залегания, а также происхождение ископаемых льдов весьма разнообразны (7, 13, 14 и др.).

С точки зрения происхождения следует различать: 1) сингенетические льды, образовавшиеся одновременно с включающими их породами; сингенетические льды встречаются исключительно в четвертичных отложениях. Таковы погребенные льды ледников, рек, озер, наледей и т. д.; 2) эпигенетические льды возникли в породе после ее образования. Они встречаются во всех породах, начиная от древнейших гранитов и гнейсов и кончая современными отложениями. Таковы льды, выполняющие трещины горных пород (жильные льды), реже линзы льда в древних и новых осадочных образованиях. Разумеется, что лед, возникающий в результате промораживания водоносных горизонтов, может быть того или иного происхождения.

По формам залегания подземные льды могут быть разделены на следующие группы:

1. Льды, выполняющие неправильные поры горных пород и другие пустоты.

2. Льды тонкослоистые, переслаивающиеся с включающими их породами.

3. Мощные пласты льдов.
4. Линзы льдов и неправильные крупные их включения.
5. Различные жильные льды, в том числе и ледяные клинья.

От чистых прозрачных льдов наблюдаются переходы в лед белый, богатый топчайшими пузырьками газа, в желтый или охристый с взвешенными в нем хлопьями лимонита или глины. Некоторые льды содержат взвесь глинистых или песчаных частиц, обломки и другие включения глинистых и прочих пород. Постепенными переходами чистые льды связаны с глинистыми и песчанистыми льдами, а эти последние с льдистыми глинами, песками брекчиями и конгломератами. Характер форм залегания и структур льда обусловлен как условиями их образования, так и последующими процессами метаморфизма.

Изучение этих интересных вопросов только недавно поставлено в повестку дня и безусловно должно много дать в отношении понимания целого ряда проблем, возникающих в процессе изучения зоны мерзлоты (4, 6, 7, 8).

Среди сингенетических льдов преобладает пластовая форма залегания. Описание этих льдов имеется в многочисленных работах северных экспедиций (5, 13, 20) русских и иностранных авторов.

Среди эпигенетических льдов распространена жильная форма залегания. Ледяные жилы[1] довольно хорошо были изучены в Сев. Америке. Они имеют много общего с жилами различных других горных пород, но по большей части отличаются малыми размерами — до 15 см. В некоторых случаях скопления ледяных жил достигают общей мощности до 3 м. Протяжение их в трещиноватых породах достигает 50 и более метров.

Жилы льда, выполняющие в горных породах неправильные трещины, повидимому, короче ледяных жил правильной формы. Длина коротких жил не превышает 8—10 м. Ледяные жилы, залегающие на глубине 30—35 м, оказались крупнее по размерам и обильнее тех жил, которые были встречены на большой глубине. На глубине в 100 м и более мощность отдельных жил льда не превосходила 6 мм, а диаметр отдельных включений льда не превышал 5 см.

Незначительные скопления льда выполняют помимо того отдельные неправильной формы пустоты, обычно встречающиеся в горных породах. Вследствие кристаллизации льда пустоты могут увеличиваться в объеме. Этот процесс аналогичен образованию брекчий в рудоносных жилах, где пространство между обломками горных пород выполнено кварцем, кальцитом или сидеритом. В толще сланцев при кристаллизации льда происходит послойное расщепление сланцев. Обломки кварцита располагаются в жилах рядами, будучи окружены со всех сторон льдом, и свидетельствуя о том, что это расположение обязано кристаллизующейся силе льда.

Интересна жила, состоящая из лимонита с содержанием до 83% по объему включений льда, с мелко-пылеватой водной окисью железа и марганца, а также небольшой примесью сурьмяной охры. Образование лимонита путем окисления сидерита произошло, повидимому, до процесса оледенения. Многие ледяные жилы содержат различные обломки горных пород, со всех сторон окруженные льдом и разобщенные друг

---

[1] В виду отсутствия материалов по ледяным жилам в русской литературе, приводится описание ледяных жил Юкона и др. по данным американских работ (7, 8, 11).

с другом — взвешенные во льду. В некоторых жилах толщина ледяной оболочки, окружающей обломки горных пород, достигает 25 мм. В одной из шахт были встречены ледяные жилы с включениями самородного серебра. Нередко жилка самородного серебра сопровождалась мягким белым налетом углекислого кальция. Образование серебра произошло до оледенения пород.

Все эти жилы состояли, повидимому, из обычного льда, так называемого льда 1-й категории, по классификации Ростальля (11), подтверждением чего является малый удельный вес льда. Лед плавает в воде. Замеренная температура мерзлой зоны не ниже — 2,25° С. Лед, полученный при высоких давлениях, тонет при погружении в воду и требует для своего образования более низких температур. По мнению автора, общее давление льда, которое вызвало разрушение кварцита и образование ледяных жил путем отодвигания стенок, составляло ориентировочно 26—43 кг/см. Вода, послужившая материалом для образования ледяных жил, поступала снизу. Чрезвычайно интересен тот факт, что она, повидимому, циркулировала в трещинах, отчасти заполненных льдом. Исследования показали, что ледяные жилы могут образоваться на глубине до 130 м в толще твердых горных пород. Силы, возникающие при кристаллизации льда, могут раздвигать плоскости напластования даже на такой глубине и вызвать отделение обломков и кусков породы с включением их в ледяную массу.

По данным Таммона и Бриджмена, «вода при замерзании в замкнутом пространстве создает давление до 2000 атм.» (22). Давление — способное раздробить любую горную породу. Ископаемые льды имеют большое значение в питании подземных и поверхностных вод Арктики. Так, по данным М. М. Ермолаева, «реки, питающиеся водами от оттаивающих погребенных льдов, не принимая в себя ни одного притока, делаются все многоводнее и многоводнее по мере приближения к своему устью» (14).

Точно так же при оттаивании ископаемые льды дают начало многочисленным источникам, питают иногда обширных размеров озера, возникшие на месте оттаивающего льда.

На поверхности земли, где залегают ископаемые льды, нередко наблюдаются воронки, блюдца, шахты — мерзлотный карст, в которые устремляется вода и которые явно свидетельствуют о питании этими водами залегающих в них или еще более глубоких водоносных горизонтов.

Огромные запасы ископаемых льдов Арктики при благоприятной обстановке могут быть использованы для водоснабжения мелких предприятий и хозяйств, а в отдельных случаях и достаточно крупных.

Все основные замечания в начале статьи, касающиеся поверхностных льдов, могут быть отнесены и к ископаемым льдам. Несомненно, что в отдельных случаях будет представляться технически целесообразным и геологически возможным использовать ископаемые льды вытаиванием в них водоемов необходимой емкости, использовав для этой цели отработанный пар или воду от охлаждения механизмов (локомобилей и т. п.).

Следует поставить на повестку дня проблему теплофикации ископаемых льдов Севера в целях водоснабжения, учитывая ограниченные водные ресурсы Арктики.

Гораздо больший практический интерес с точки зрения водоснабжения должна представлять жидкая фаза межмерзлотных вод, которую

в дальнейшем и будем называть межмерзлотными водами (в узком смысле). Основной чертой жидкой фазы является ее непрерывная динамика — залог сохранения этих вод от замерзания.

Межмерзлотные воды следует рассматривать как связующее звено между надмерзлотными и подмерзлотными водами. Огромное практическое значение межмерзлотных таликов заключается в том, что они являются теми путями, по которым происходит питание подмерзлотных вод — нисходящие межмерзлотные воды, или, наоборот, — подъем через мерзлую зону надмерзлотных вод — восходящие межмерзлотные воды. Область питания межмерзлотных вод лежит за пределами мерзлой зоны, на ней или под ней. В зависимости от характера питания межмерзлотные воды приобретают тот или иной режим, химический и газовый состав. Среди них широко распространены воды с температурами, близкими к 0°—это область наиболее низкотемпературных вод земного шара. Пестрота состава, дебита, форм залегания дополняют их характеристику.

Можно выделить следующие главнейшие формы залегания межмерзлотных вод.

1. *Пластовые воды.* Они возникают в результате сохранения водоносного пласта или части его от промораживания. Наиболее часто эта форма залегания встречается среди аллювиальных отложений. Водоносные галечники и пески сохраняются в талом состоянии, тогда как глина и суглинки, с которыми они переслаиваются, промерзлы. Примеры так называмой «слоистой мерзлоты», представляющей собою чередование прослоев межмерзлотных водоносных горизонтов с неводоносными промороженными породами, приведены у А. В. Львова (9) и М. И. Сумгина (13). Поиски этих вод должны производиться на дне долин ближе к тальвегу.

2. *Жильные воды* встречаются среди разнообразных трещиноватых горных пород. Как это отмечают американцы, потоки подземных вод часто бывают приурочены к различным нарушениям в геологическом строении и к жилам, встречающимся в мерзлой зоне. Эти потоки в большинстве случаев являются объектом весьма тщательного исследования со стороны разведчиков и золотоискателей, так как обладают свойством окислять металлы, содержащиеся в жилах.

Жильные воды были встречены при разведках и гидрогеологических исследованиях по южной периферии мерзлой зоны, а также по Амурской ж. д. (9). В условиях мощного развития мерзлой зоны жилы принимают трубообразный или близкий к нему характер залегания, ибо в результате промерзания всех небольших водоносных трещин в породе сохраняются лишь главные, наиболее водообильные. Размер сечения такого потока находится в зависимости от количества тепла, им проносимого, характера теплопроводности породы и температуры окружающей его мерзлой зоны. Закономерности в движении тепла и воды в обычных водопроводах и в подобных естественных водопроводах должны быть примерно одни и те же. В водопроводах, проложенных в условиях глубокого промерзания, при остановке движения воды или усилении теплоотдачи в мерзлый грунт в связи с замедлением движения (или с усилением общего промерзания в грунте с наступлением морозов), может произойти замерзание и разрыв труб (21). Точно те же явления нами наблюдаются и в условиях жильных, а также и других форм залегания межмерзлотных вод. Жильные льды, охарактеризованные выше, представляют собою промерзшие природные водопроводы, но с неправильным сечением труб. Здесь наблюдаются разрывы стенок, отщепле-

ние коренных пород и т. п. Для того чтобы разобраться в сложных явлениях промерзания межмерзлотных вод, необходимо вникнуть хорошо в работу водопроводов в мерзлых грунтах. Не имея возможности задерживаться на этом, сошлемся на интересные работы М. Л. Чернышева (21) и А. А. Сурина (15). Между твердой и жидкой фазами межмерзлотных вод существует сложное подвижное равновесие. При изменении гидрогеологических условий циркуляции межмерзлотных вод происходит нарушение подвижного равновесия установившегося теплового баланса, которое и влечет за собою рост или уменьшение межмерзлотного талика. Главными причинами, которые могут вызвать уменьшение размеров таликов, являются:

a) Общее понижение температуры мерзлой зоны в целом или части ее. Промерзание начинается с верхней поверхности мерзлой зоны и может повлечь за собою закупорку выхода подземных вод на поверхность. Приостановка в движении подземных вод неизбежно сопровождается их промерзанием, начинающимся с периферии талика к его центру. Если такое промерзание продлится достаточно долго, то в талике образуется ледяная пробка, которая обеспечит приостановку движения воды и полное промерзание всего талика. В связи с неоднородностью в строении и различной теплопроводностью пород, а также с изменчивостью гидрогеологических свойств водопроводящего пути может возникнуть несколько пробок, разобщающих поток на участки. b) Происходит уменьшение количества воды, проходящей по данному талику, а следовательно и проносимого ею тепла. Оно может быть обусловлено изменением условий режима надмерзлотного или подмерзлотного водоносного горизонта, питающего данный талик; уменьшением количества выпадающих осадков, изменением условий подземного стока вследствие дренажа, естественного или искусственного, питающего талик водоносного горизонта. Например, питающий талик водоносный надмерзлотный горизонт дренирован эксплоатирующейся артезианской скважиной. Производительность талика уменьшилась, начинается его оледенение. Оно приводит к уменьшению или полному исчезновению источника, питавшегося за счет талых вод, не только вследствие падения напора, но и промерзания талика.

Второй случай. Талик питается надмерзлотными водами. Условия питания надмерзлотных вод изменились в сторону уменьшения количества их. Уменьшается количество циркулирующей воды по талику. Следует его оледенение.

Изменение условий стока проходящей по талику воды также может повлечь за собою промерзание межмерзлотных вод. Так, например, неудачно построенный каптаж вызвал повышение абсолютной отметки каптированного источника. В связи с этим происходит замедление стока подземной воды, и начинается промерзание талика, которое может обусловить полное исчезновение источника.

Кроме причин, указанных в «a» и «b», могут быть их комбинации, а также и другие.

Само собою разумеется, что изменение условий теплового баланса в сторону повышения температуры мерзлой зоны и т. п. может повлечь за собою не только увеличение размеров уже существующих таликов, но также и появление новых.

В направлении от центра района мерзлой зоны к его периферии роль межмерзлотных таликов и их размеры увеличиваются; появляется «особый тип» вечной мерзлоты с «островами таликов», в дальнейшем

переходящий в «острова мерзлоты среди таликов». Так постепенно от типичных межмерзлотных вод мы переходим к районам распространения подземных вод вне зоны мерзлоты. Мы приводим грубую схему изменения талика (рис. 4), отметив, что подобные изменения происходят как в пространстве с переходом от центра к периферии мерзлой зоны, так и во времени в связи с ослаблением процесса оледенения литосферы.

В виду того, что межмерзлотные талики не имеют самостоятельных областей питания и тесно связаны с подмерзлотными водами, поисков и разведки тех и других мы касаемся позднее.

III. ПОДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ

В широком смысле слова подмерзлотными водами называются все воды, залегающие под мерзлой зоной, как непосредственно с ней сопри-

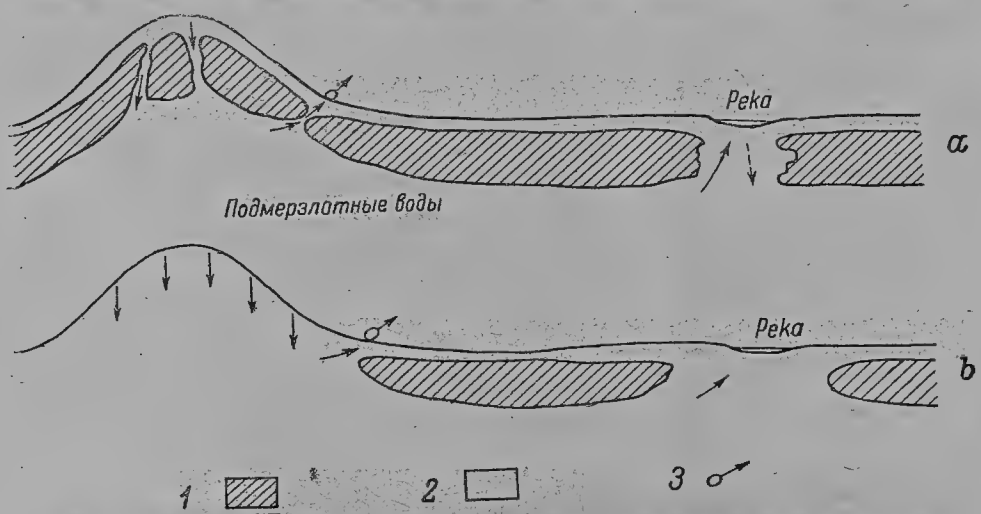


Рис. 4. Схема изменения таликов от районов „сплошной мерзлоты" (a) к районам „островной мерзлоты" (b).
1—зона мерзлоты. 2—талики. 3—источник.

касающиеся, так и более глубокие. Некоторые авторы не вполне справедливо относят к ним только воды, залегающие в аллювиальных отложениях.

Нижняя поверхность мерзлой зоны нередко является водоупорной кровлей подмерзлотных водоносных горизонтов. Воды эти обычно обладают напором, а скважины, вскрывшие подмерзлотные горизонты, иногда и фонтанируют. Под охлаждающим влиянием зоны мерзлоты подмерзлотные воды имеют низкие температуры, близкие к 0°.

По данным гидрогеолога П. М. Козлова (1933 г.) на одном из арктических островов буровая скважина, пройдя мерзлую зону, на глубине 130 м от поверхности встретила соленую воду с минерализацией в 54—56% и с температурой в минус 3° С. Мы не знаем, пройден или нет данный водоносный горизонт, но, видимо, в отдельных случаях не исключаются и отрицательные температуры подмерзлотных вод. Подобного рода весьма холодные воды мы в праве ожидать в пределах раз-

вития кембро-силура Восточной Сибири, с которым связано распространение соленых вод, допускающих значительное переохлаждение. По побережью Арктики и на ее островах соленые воды моря, проникая под мерзлую зону, могут также дать отрицательные температуры.

В большинстве других случаев температура подмерзлотных вод положительна, твердая фаза отсутствует. Хотя не исключена возможность нахождения линз мерзлой зоны в пределах распространения подмерзлотных вод.

По мере углубления от нижней поверхности мерзлой зоны температура подземных вод возрастает. По данным С. В. Комиссарова, для Ю. Забайкалья на каждые 6 м температура увеличивается на 0,1 С°. Цифра внушает сомнения в ее точности, но других данных пока мы не имеем.

Верхний предел распространения подмерзлотных вод лимитируется зоной мерзлоты. Он колеблется от немногих метров для ее периферии до десятков и сотен метров — для центральной части. В условиях Арктики подмерзлотные воды залегают наиболее глубоко. Среди подмерзлотных вод можно выделить:

1. Подмерзлотные воды в аллювиальных отложениях, довольно широко распространенные в периферических частях ее — Южное Забайкалье, бассейн Витима у Бодайбо и некоторых других. Подмерзлотные воды в аллювиальных отложениях должны быть встречены в Арктике в качестве исключения, ибо аллювий здесь в основном промерзен нацело.

2. Подмерзлотные воды пластовые, приуроченные к нормальным осадочным отложениям. Таковы подмерзлотные водоносные горизонты четвертичных, меловых и юрских отложений, отчасти триаса и палеозоя.

3. Трещинные подмерзлотные воды в трещинах разнообразных горных пород.

4. Трещинно-карстовые, приуроченные к известнякам, доломитам, а также к глинистым породам.

Характеристика и условия залегания подмерзлотных вод изложены с достаточной полнотой в предыдущих работах автора статьи (16, 17, 10).

Отметим, что характер залегания и условия циркуляции подмерзлотных вод аналогичны таковым районов вне «вечной» мерзлоты. *Условия же питания и стока подмерзлотных вод резко отличны и в основном неблагоприятны, особенно в северных районах.*

Мощность зоны мерзлоты достигает в Арктике своих наивысших возможных пределов, вследствие чего и количество таликов, по которым возможно питание подмерзлотных вод, резко сокращается. Пластовые водоносные горизонты, близко залегающие от поверхности, оказываются промороженными и становятся неводоносными. Разрушенные процессами выветривания, трещиноватые коренные породы в своей наиболее водообильной части содержат трещинно-жильные льды, вместо воды, а на большой глубине за пределами мерзлой зоны водоносность их настолько падает, что целесообразность разведки на воду становится сомнительной, а в ряде случаев и ненужной.

После неудачной попытки купца Шергина получить подмерзлотную воду в Якутии вопрос о возможности извлечения подмерзлотных вод на севере Сибири долгое время оставался открытым. Наличие источников в районах «сплошной» мерзлоты объяснялось их «ювенильным» происхождением. Возможность питания подмерзлот-

ЧІТАЛЬНА
Обл. Центр. Бібліотекалён
— Сыктывкар —

ных вод за счет атмосферных осадков ставилась под сомнение. Работами последних лет в Америке, Забайкальских гидрогеологических партий и некоторых других в СССР доказано, что вместо предполагаемого сплошного распространения зоны мерзлоты мы имеем дело с мерзлотой, пронизанной ходами таликов, по которым происходит питание подмерзлотных вод.

Можно выделить пока два типа таликов питания подмерзлотных вод:

Первый — забайкальский. Он характеризуется отсутствием мерзлой зоны на водоразделах и мощным ее развитием в долинах. Здесь питание подмерзлотных вод происходит на водоразделах.

Второй — печорский. Он освещен в работе Н. Г. Датского (3). В противоположность первому, мерзлая зона залегает в пределах водоразделов и междуречных пространств, но отсутствует в долинах рек. Чрезвычайно ценный материал приводится в работе И. М. Светозарова (12) по протоке р. Лены в г. Якутске, где при ширине протоки в 700 м под дном ее мерзлая зона не обнаружена на глубину свыше 25 м.

Если принять во внимание ширину р. Лены с протоками до 10 км, то создается полная уверенность, что под руслом Лены зона мерзлоты отсутствует и при благоприятных гидрогеологических условиях может существовать непосредственная связь между под- и надмерзлотными водами. Следовательно, долины крупных непромерзших рек, крупные непромерзшие озера могут являться теми местами, под которыми происходит живая связь всех трех типов подземных вод зоны мерзлоты.

Таким путем в настоящее время создается некоторая уверенность в том, что на территории Арктики, наряду с обширными массивами сплошного распространения зоны мерзлоты, могут существовать участки, лишенные таковой и обеспечивающие питание подмерзлотных вод за счет атмосферных и поверхностных вод.

Если возможность питания подмерзлотных вод за счет атмосферных осадков и поверхностных вод ставилась некоторыми авторами под вопрос, то в существовании подмерзлотных вод вообще сомневаться особенно не приходилось, поскольку непромерзающие зимою и подчас с значительным дебитом источники являлись неопровержимым фактом существования подземных вод ниже мерзлой зоны.

Условия выхода подмерзлотных вод на поверхность указаны в работах многих авторов, и на них мы не будем останавливаться. Следует отметить, что лучше всего выход источников фиксируется в зимнее время продуктом его деятельности — наледью. В условиях Арктики наледи в горных районах встречаются значительно чаще, чем в иных. Это обстоятельство объясняется тем, что в горных районах дренаж литосферы более совершенный, большое количество водоносных пластов и трещин вскрыто глубокими долинами и ущельями гор, а следовательно имеются более благоприятные условия для выхода подземных вод на поверхность. Крупные, действующие круглую зиму, наледи обязаны своим происхождением мощным водоносным горизонтам, особенно часто трещинно-карстовым водам известняков. Нередко наледи располагаются по тектоническим контактам, зонам наибольшего раздробления пород и всегда там, где дренируется водоносный пласт. Отмеченная для Забайкалья (10) особенность выхода источников и наледей, состоящая в том, что большинство их приурочены к склонам «солнопечным», обращенным на S, SO и SW, для условий Арктики вряд ли будет характерна, ибо здесь такого резкого контраста в силе обогрева склонов равной

экспозиции не существует, на что совершенно справедливо указывает Б. Н. Городков.

В предыдущей работе М. И. Сумгина (13) приводились огромные размеры некоторых наледей. Длительный процесс промерзания горных пород уничтожил все небольшие маломощные источники, проморозив пути, по которым шла питающая их вода. Сохранились лишь мощные струи, которые выносят достаточное количество тепла, чтобы успешно бороться с мерзлотою. Они-то и являются причиной образования крупных наледей. В руде случаев количество тепла, выносимого источниками, настолько велико, что они сохраняют от промерзания отдельные участки рек, образующих здесь так называемые полыньи.

Рис. 5. Гидролакколит Хада-Булака с мерзлотно-карстовой воронкой на месте просевшей вершины. (Вост. Забайкалье.)

При гидрогеологических исследованиях, поисках и разведке *подмерзлотных* вод в условиях Арктики, наряду с изучением общей гидрогеологии, геологического строения, структур, естественных и искусственных выходов подземных вод и т. п., должно быть обращено внимание на изучение состава, строения, температуры мерзлой зоны. Особое внимание должно быть уделено наледям и гидролакколитам (рис. 5), а также полыньям (9, 10, 13, 17, 18). Пластовые отложения разбуриваются в тех участках, где есть основание встретить водоносный горизонт ниже мерзлой зоны. В случае синклинальной складки бурение ведется по оси складки. Более целесообразным представляется захват воды не из первого подмерзлотного горизонта — с холодной водой, которая может замерзнуть в трубах, а из более низкого с «теплой» водой. Если водоносные пласты падают под некоторым углом, то скважина закладывается с расчетом перехватить воду несколько ниже мерзлой зоны.

В области развития трещинных вод дело осложняется. Наиболее верным будет каптаж источников, так как выходами источников обычно фиксируются крупные водоносные зоны трещин. Если каптаж источника по тем или иным соображениям отпадает, то водоносная

зона, обусловившая его выход, прослеживается по простиранию, и разведка на воду ведется в пределах этой зоны на подходящем участке.

При отсутствии выходов подмерзлотных вод поиски подмерзлотных вод следует ставить на тектонических контактах в зоне тектонических разломов и нарушений. Следует помнить, что верхний трещиноватый пояс в условиях Арктики большей частью проморожен и воды дать не может.

Поиски трещинных вод в сланцах палеозоя и мезозоя в Забайкалье, где мерзлая зона имеет небольшую мощность, производились иногда и по чисто морфологическим соображениям. Скважины закладывались у подошвы склонов, причем они почти всегда оказывались водоносными.

Более благоприятные результаты получились при заложении скважин у подошвы склонов, обращенных к югу, ибо здесь склоны разрушены и трещиноваты на большую глубину, чем склоны другой экспозиции. В этом отношении разрушение гор в условиях мерзлой зоны происходит аналогично разрушению зданий. Как известно, наибольшее количество деформаций происходит на южной стороне зданий (14, 22).

Пьедестал гор, обращенный к югу, в условиях Забайкалья подвержен наибольшему удару солнечных лучей и растрескиванию, под влиянием замерзающих в капиллярах и других трещинах обычно здесь именно неглубоко залегающих подземных вод.

Неблагоприятные результаты были получены при бурении в гранитах (9). Скважина на ст. Зубарево глубиною в 161 м оказалась практически безводною. Скважина на ст. Зилово глубиною в 115 м, при мощности мерзлой зоны около 38 м, заложенная в гранитах, была маловодной. Бурение на воду в гранитах *при условии мощного развития мерзлой зоны,* отсутствии источников и ясно выраженных раздробленных участках *представляется нецелесообразным.* В лучшем случае оно может обеспечить водою небольшое хозяйство. Бурение на воду в мощных массивах известняков может дать количественно удовлетворительные результаты, но качественный состав воды может оказаться неблагоприятным.

В районах с развитием «забайкальского» типа питания подмерзлотных вод целесообразно бурить у подошвы склонов. В районах с «печорским» типом питания разведку надлежит ставить ближе к тальвегу долины и руслу реки при прочих равных гидрогеологических условиях.

В районах сплошного развития зоны мерзлоты при оценке ресурсов подмерзлотных вод целесообразнее исходить из предположения, что питание их за счет притока поверхностных и др. вод отсутствует или настолько мало, что его не следует принимать во внимание. В таком случае оценка водных ресурсов выразится в определении мертвых (статических) запасов подмерзлотных вод. Подсчет запасов воды в основном будет состоять в определении объема пор, заключенных в данном водоносном пласте, и его водоотдающих свойств.

Наиболее дешевыми и достаточно благонадежными в эксплоатационном отношении являются колодцы, заложенные в пределах полыньи, обусловленной выходами теплых вод. Колодцы, заложенные в полынье, не промерзают, работают бесперебойно в течение круглого года и не нуждаются в отеплении.

В заключение следует сказать, что наука о подземных водах и льдах — гляциогидрогеология находится на заре своей юности и требует внимательного ухода и заботы со стороны промышленных и хозяйствен-

ных организаций. Для ее успешного развития должны объединиться геологи, гидрогеологи, инженеры, представители различных других специальностей.

Комплексное разрешение ряда проблем, выдвигаемых гляциогидрогеологией, требует применения полевых экспедиционных, стационарных и лабораторных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов И. Я. Некоторые замечания по характеристике подземных вод района устойчивой мерзлоты спорадического типа (с. Братск. Восточно-Сибирского края). Водное богатство недр земли на службу социалистическому строительству. Труды 1-го Всесоюзного гидрогеологического съезда. Сборник 4. Л.-М., 1934 г.

2. Бутов П. И., Тихомиров Н. К. и Толстихин Н. И. Наблюдения за уровнем подземных вод. Методы исследования и определения жидких полезных ископаемых. Главн. геол.-разв. упр. Л.-М., 1933 г.

3. Датский Н. Г. Вечная мерзлота и условия строительства в Усинской лесотундре Северного края. Л. 1934 г.

4. Добровольский А. В. La glace au point de vue petrographique (Essai de classification des roches de glace). Bull. Soc. France Mineral. Paris, 54, 1931.

5. Зайков Б. Д. Материалы по гидрологии Верхнего Алдана. Изд. Ак. наук. М.-Л., 1935 г.

6. Kokkonen P. Beobachtungen über die Struktur des Bodenfrostes. Acta Forrest. Fenia. Hls., 1926.

7. Leffingwell E. de K. Ground ice wedges the dominant from of Ground ice on the Noreth Coast of Alasca. Journ. of Geolog. XXIII. 7 oct. 1915.

8. Он же. The Canning River region Northern Alasca. Wash. 1919. (U. S. Geolog. Survey, p. 109).

9. Львов А. В. Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на западной части Алданской ж. д. в условиях вечной мерзлоты почвы. Иркутск, 1916.

10. Обидин Н. И. и Толстихин Н. И. Наледи Восточного Забайкалья. Рукопись. Кабинет Учета воды сектора гидрогеологии ЦНИГРИ. 1933 г.

11. Rostall. Physico-Chemical Geology. 1927, p. 17.

12. Светозаров И. М. Гидрогеология вечной мерзлоты по материалам исследований в районе Якутска. Проблемы советской геологии. № 10. Москва, 1934 г.

13. Сумгин М. И. Вечная мерзлота на севере СССР, 1935 г.

14. Сумгин М. И. Вечная мерзлота. Москва, 1934 г.

15. Сурин А. А. К вопросу об устройстве водопровода в мерзлых грунтах. 1915 г.

16 Толстихин Н. И. Подземные воды Бурято-Монгольской АССР. Проблемы Бурято-Монгольской АССР. Том I, изд. Ак. наук СССР. М.-Л., 1935.

17. Толстихин Н. И. Подземные воды в четвертичных отложениях районов вечной мерзлоты. Труды II международной конференции ассоциации по изучению четвертичного периода Европы. Выпуск II. Л.-М., 1933 г.

18. Толстихин Н. И. Краткая инструкция по изучению „вечной" мерзлоты при проведении общей геологической съемки. Изд. ЦНИГРИ. Л.-М., 1935.

19. Fitton E. M. The Climates of Alasca „Monthly Weather rewiew". Wash., 58 Mz. 1913.

20. Хмызников П. К. Гидрология бассейна реки Яны. Изд. Ак. наук СССР и Гидрографического управления Главсевморпути. Ленинград, 1934 г.

21. Чернышев М. Я. проф. Водоснабжение в вечной мерзлоте. Москва, 1934 г.

22. Щелоков А. А. проф. Особенности строительства аэродромных сооружений в районах вечной мерзлоты. ОНТИ НКТП. М.-Л., 1934 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3

М. И. Сумгин. Вечная мерзлота на севере СССР 7

С. С. Ковнер. К математической теории промерзания 34

В. К. Яновский. К вопросу о методах исследования вечной мерзлоты в целях проектирования инженерных сооружений 42

I. Введение 42

II. Предварительные (рекогносцировочные) последствия 44

III. Окончательное детальное исследование 46

IV. Значение отдельных объектов исследований для проектирования сооружений 47

V. Детальная мерзлотная съемка 56

VI. Разведочные работы 60

VII. Геофизические наблюдения 67

VIII. Изучение режима надмерзлотных вод 72

IX. Полевые испытания грунтов 73

X. Обработка результатов полевых исследований 74

XI. Заключение 77

Н. А. Цытович. Принципы конструирования и расчета фундаментов сооружений, возводимых на вечной мерзлоте 78

I. Деформация сооружений 78

II. Влияние вечной мерзлоты на сооружения 79

III. Влияние сооружений на вечную мерзлоту 81

IV. Механические свейства мерзлотных грунтов 86

V. О выборе типа фундаментов 92

VI. Принцип сохранения режима мерзлоты 94

VII. Принцип уничтожения режима мерзлоты 97

Н. И. Толстихин. Гидрогеологические условия водоснабжения в районах мерзлой зоны литосферы (вечной мерзлоты) 102

I. Надмерзлотные воды 104

II. Межмерзлотные воды 116

III. Подмерзлотные воды 122

Литература 127

ЧІТАЛЬНА
Обл. Центр. Бібліотекалӧн
— Сыктывкар —